

UNIVERSITÀ DI PISA

Scuola di Dottorato in Ingegneria “Leonardo da Vinci”



**Corso di Dottorato di Ricerca in
INGEGNERIA MECCANICA**

Tesi di Dottorato di Ricerca

**MODELLAZIONE NUMERICA E ANALISI SPERIMENTALE
DELLA FRAMMENTAZIONE IN CONDIZIONI DI ELEVATA
VELOCITÀ DI DEFORMAZIONE**

Autore:

Domenico Villano _____

Relatori:

Prof. Marco Beghini _____

Prof. Leonardo Bertini _____

Anno 2012

A mia madre

SOMMARIO

L'attività di ricerca riguarda lo studio del comportamento meccanico di materiali sottoposti a sollecitazioni di natura impulsiva. Nello specifico lo studio si incentra sulla modellazione e l'analisi della frammentazione in condizioni di alto strain-rate. Data la disponibilità di risultati sperimentali, l'attività si è concentrata sui materiali impiegati nella progettazione avanzata di sistemi di difesa. Dapprima sono stati classificati i materiali impiegati in quest'ambito e sono state caratterizzate le sollecitazioni dinamiche di maggiore interesse. In un secondo momento, ci si è concentrati sulle tecniche di progettazione e sperimentazione di strutture sottoposte a carichi impulsivi.

Il lavoro di tesi ha l'obiettivo di verificare l'applicabilità di tecniche innovative nella realizzazione di teste in guerra a frammentazione controllata per munizionamento guidato di ultima generazione. La società OTO Melara ha condotto negli ultimi anni diversi studi per lo sviluppo delle teste in guerra delle munizioni DART e della famiglia Vulcano. L'impiego di teste in guerra a frammentazione controllata permette di incrementare le prestazioni delle munizioni guidate, sopperendo in parte al minor carico pagante che le contraddistingue rispetto al munizionamento convenzionale. L'incremento delle prestazioni e, quindi, dell'efficienza delle munizioni guidate, insieme alla loro elevata precisione di ingaggio dei bersagli, rappresentano pesanti fattori di riduzione dei loro danni collaterali.

Lo studio si è articolato in una prima fase di analisi delle teorie di frammentazione e dello stato dell'arte nella frammentazione controllata che ha consentito l'individuazione di alcune tecniche innovative. Successivamente, sono stati elaborati modelli software per la previsione di queste tecniche e si è proceduto a test sperimentali per la verifica ed il confronto delle stesse con la frammentazione naturale. L'analisi dei dati empirici emersi dalle prove ha individuato le due tecniche più performanti nella frammentazione controllata e ha permesso la revisione dei modelli di simulazione approntati. Su questi risultati è possibile basare l'architettura di futuri studi mirati alla massimizzazione delle prestazioni di teste in guerra a frammentazione controllata.

ABSTRACT

This research aims to study the mechanical behavior of materials under impact loading. The study is focused on modeling and analysis the fragmentation in high strain-rate conditions. Thanks to experimental data, the research studied materials for design of advanced defense systems. Firstly, the materials adopted in this field have been cataloged and the most important dynamic loads have been identified. Later, the study has been focused on the techniques for design and test of structures under impact loading.

The purpose of this paper is to verify the applicability of innovative technologies for manufacturing controlled fragmentation warheads, with particular attention to guided ammunition. Several studies were conducted by the OTO Melara company during the warhead development of DART and Vulcano family munitions. The lethality of the guided munitions can be considerably increased with controlled fragmentation warheads. This increase can compensate a lower payload of the guided munitions.

After introducing the concept of warhead and its natural fragmentation, the paper describes both the elements of fracture mechanics related to the fragmentation and the state of the art of controlled fragmentation. A preliminary evaluation of controlled fragmentation technologies is illustrated along with the numerical models developed for predicting the natural and controlled fragmentations. The most promising technologies are presented in detail and the features of the warheads used for the experiments are defined. A description of the entire experimental phase is provided, including results of arena tests, data analysis and revision of numerical models. The applicability of some innovative technologies for controlled fragmentation warheads is fully demonstrated. Two technologies in particular, the laser micro-drilling and the double casing solution, provide a high increase of the reference warhead lethality.

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
1.1 Testa in guerra	1
1.1.1. Classificazione	2
1.1.2. Progettazione	2
1.1.3. Casing	3
1.2 Frammentazione naturale	5
1.2.1. Perdita di velocità in aria	6
1.2.2. Esplosivo	7
1.2.3. Distribuzione di massa	8
2. FRAMMENTAZIONE CONTROLLATA	12
2.1 Teoria della frattura	12
2.1.1. Propagazione delle onde di shock	12
2.1.2. Teoria meccanica classica	13
2.1.3. Linee di frattura	14
2.2 Stato dell'arte	16
2.2.1. Intagli esterni	16
2.2.2. Intagli interni	16
2.2.3. Intagli sull'esplosivo	17
2.2.4. Trattamento localizzato	18
3. RICERCA DEL SISTEMA DI CONTROLLO DELLA FRAMMENTAZIONE	19
3.1 Modelli di simulazione	19
3.1.1. Frammentazione naturale	19
3.1.2. Analisi prestazionale	23
3.1.3. Analisi strutturale	27
3.1.4. Frammentazione controllata	27
3.2 Valutazione preliminare delle tecniche innovative	29
3.2.1. Criteri di valutazione	29
3.2.2. Risultati preliminari	29
4. LE TECNICHE INNOVATIVE DI CONTROLLO DELLA FRAMMENTAZIONE	32
4.1 Tempra laser superficiale	32
4.2 Saldatura laser profonda	35

4.3 <i>Micro-foratura laser</i>	37
4.4 <i>Trattamento chimico di nitrurazione</i>	40
4.5 <i>Doppio casing con corpo interno intagliato esternamente</i> ...	42
5. FASE SPERIMENTALE	48
5.1 <i>Layout di prova</i>	48
5.2 <i>Analisi dei dati</i>	49
5.3 <i>Revisione dei modelli di calcolo</i>	57
6. CONCLUSIONI	62
RIFERIMENTI	63

LISTA DEI SIMBOLI

A = area della sezione frontale media della scheggia
 a_i, b_i, k = coefficienti
 C = massa esplosivo
 C_d, C_x = coefficienti di *drag* di scheggia e proiettile
 f = fattore di forma della scheggia
 M, m, m_r = masse di *casing* e scheggia
 $m_{1/2}, \mu$ = parametri delle distribuzioni di massa
 n = numero di schegge
 p = numero di perforazioni
 s = distanza
 t = spessore del bersaglio
 UTS = carico di rottura
 V, V_o, V_r = velocità della scheggia
 V_C = velocità di Gurney
 θ = angolo di impatto della scheggia

INDICE DELLE FIGURE

<i>Fig. 1 – Schema della sezione longitudinale di una TIG per proiettile.</i>	1
<i>Fig. 2 – Esempi di TIG applicabili a proiettili di artiglieria o missili [10].</i>	2
<i>Fig. 3 – Schegge preformate per TIG a frammentazione tipo PFF.</i>	3
<i>Fig. 4 – Schematizzazione di una TIG complessa per proiettili sotto-calibrati.</i>	4
<i>Fig. 5 – TIG a frammentazione controllata con intagli interni al casing [9].</i>	4
<i>Fig. 6 – Velocità iniziali delle schegge di TIG complessa per proiettile.</i>	5
<i>Fig. 7 – Andamento nello spazio delle velocità di schegge di varia massa.</i>	6
<i>Fig. 8 – Confronto di scheggiature ottenute da diversi proiettili di artiglieria.</i>	8
<i>Fig. 9 – Densità di probabilità di diverse leggi di distribuzione di massa.</i>	9
<i>Fig. 10 – Cumulative normalizzate di diverse leggi di distribuzione di massa.</i>	9
<i>Fig. 11 – Esempio di scheggiatura derivante da frammentazione naturale [10].</i>	10
<i>Fig. 12 – Esempio di impatti di schegge derivante da frammentazione naturale</i>	11.
<i>Fig. 13 – Esempio di frattura per onde di shock [9].</i>	12
<i>Fig. 14 – Fratture di trazione e taglio.</i>	13
<i>Fig. 15 – Linee di frattura primarie e secondarie [9].</i>	14
<i>Fig. 16 – Effetto sulla frammentazione di intagli asimmetrici [9].</i>	14
<i>Fig. 17 – Formazione di schegge controllate.</i>	15
<i>Fig. 18 – Scheggia teorica (grigio) e scheggia effettiva (viola).</i>	15
<i>Fig. 19 – Casing con intagli esterni per TIG a frammentazione controllata.</i>	16
<i>Fig. 20 – TIG a frammentazione controllata con intagli interni al casing.</i>	17
<i>Fig. 21 – Schema di frammentaz. controllata con intagli esterni sull'esplosivo.</i>	17
<i>Fig. 22 – Studio di micro-foratura laser.</i>	18
<i>Fig. 23 – Velocità iniziale delle schegge simulata per la frammentaz. naturale.</i>	19
<i>Fig. 24 – Modello Split-X della testa in guerra a frammentazione naturale.</i>	20
<i>Fig. 25 – Modello Autodyn della testa in guerra a frammentazione naturale.</i>	20
<i>Fig. 26 – Andamento temporale delle velocità assolute per i punti di controllo.</i>	20
<i>Fig. 27 – Profilo di velocità delle schegge formate a 10 μs e 20 μs (Autodyn).</i>	21
<i>Fig. 28 – Profilo di velocità delle schegge formate a 30 μs e 104 μs (Autodyn).</i>	22
<i>Fig. 29 – Tensione equival. di Von Mises nello spessore della TIG allo sparo.</i>	23
<i>Fig. 30 – Capacità di perforazione per diverse distanze dalla TIG.</i>	24
<i>Fig. 31 – Perforazione per schegge di diversa massa a 4 m dalla TIG.</i>	25
<i>Fig. 32 – Perforazione vs distanza per schegge di diversa massa.</i>	26
<i>Fig. 33 – Simulazione della distribuz. di massa per frammentazione naturale.</i>	26
<i>Fig. 34 – Tensione equival. di Von Mises nello spessore della TIG allo sparo.</i>	27
<i>Fig. 35 – Schema di pattern geometrico eseguito per percorso di infragilimento.</i>	28

<i>Fig. 36 – Schegge utili per il target di riferim. al variare del numero di principi.</i>	28
<i>Fig. 37 – Testa per la parzializzazione del lascio laser per tempra superficiale.</i>	32
<i>Fig. 38 – Andamento della durezza in funzione delle profondità.</i>	33
<i>Fig. 39 – Macrografia del trattamento di tempra laser superficiale.</i>	34
<i>Fig. 40 – Test di saldatura laser profonda.</i>	36
<i>Fig. 41 – Proвинi per test di trazione e resilienza con saldatura laser profonda.</i>	36
<i>Fig. 42 – Simulazione della distribuzione di massa per saldatura laser profonda.</i>	37
<i>Fig. 43 – Macchina di micro-foratura laser.</i>	38
<i>Fig. 44 – Test di micro-foratura laser.</i>	38
<i>Fig. 45 – Simulazione della distribuzione di massa per micro-foratura laser.</i>	39
<i>Fig. 46 – Dettagli di lavoraz. di micro-foratura prima (sx) e dopo (dx) lucidatura.</i>	40
<i>Fig. 47 – Casing con trattamento di nitrurazione.</i>	41
<i>Fig. 48 – Soluzione a doppio casing con intagli sull'esterno del corpo minore.</i>	42
<i>Fig. 49 – Velocità iniz. delle schegge simulata per la soluzione a doppio casing.</i>	43
<i>Fig. 50 – Massa a framment. non controllata al variare del numero di principi.</i>	44
<i>Fig. 51 – Numero schegge controllate al variare del nr. di principi dell'elicoide.</i>	44
<i>Fig. 52 – Massa schegge controllate al variare del nr. di principi dell'elicoide.</i>	45
<i>Fig. 53 – Analisi strutturale soluzione doppio casing.</i>	45
<i>Fig. 54 – Simulazione della distribuzione di massa per doppio casing.</i>	46
<i>Fig. 55 – Simulazioni delle distribuzioni di massa delle varie tecniche in esame.</i>	47
<i>Fig. 56 – Layout di prova del test arena.</i>	48
<i>Fig. 57 – Foto del test arena. Si notano TIG, cartoni, lamiere e break-screen.</i>	49
<i>Fig. 58 – Risultati sperimentali in numero di perforazioni sul target a 4 m.</i>	51
<i>Fig. 59 – Risultati sperimentali in numero di perforazioni sul target a 8 m.</i>	51
<i>Fig. 60 – Numero di perforazioni sul target di riferimento.</i>	52
<i>Fig. 61 – Cumulata del numero di schegge per le diverse configurazioni testate.</i>	53
<i>Fig. 62 – Cumulata della massa TIG per le diverse configurazioni testate.</i>	53
<i>Fig. 63 – Frequenze delle classi di massa per le diverse configurazioni testate.</i>	54
<i>Fig. 64 – Frequenza percentuale.</i>	54
<i>Fig. 65 – Foto di schegge raccolte dopo i test arena per ogni tecnica testata.</i>	56
<i>Fig. 66 – Modelli di distribuzione di massa per frammentazione naturale.</i>	58
<i>Fig. 67 – Distribuz. schegge da framm. naturale prima e dopo la fase sper.</i>	58
<i>Fig. 68 – Distribuz. schegge con saldatura laser prof. prima e dopo gli scoppi.</i>	59
<i>Fig. 69 – Distribuz. schegge con micro-foratura laser prima e dopo gli scoppi.</i>	60
<i>Fig. 70 – Masse schegge da framm. controllata prima e dopo rev. modello.</i>	61
<i>Fig. 71 – Distribuz. schegge doppio casing prima e dopo gli scoppi.</i>	61

INDICE DELLE TABELLE

<i>Tab. I – Coeff. di drag per varie forme delle schegge di una frammentazione.</i>	7
<i>Tab. II – Valutazione preliminare delle tecniche innovative di frammentazione.</i>	30
<i>Tab. III – Parametri del trattamento di tempra laser superficiale.</i>	33
<i>Tab. IV – Parametri del trattamento di saldatura laser profonda.</i>	35
<i>Tab. V – Ris. delle prove di trazione e resilienza con tempra laser superficiale.</i>	36
<i>Tab. VI – Risultati delle prove di trazione e resilienza con micro-foratura laser.</i>	39
<i>Tab. VII – Risultati delle prove di trazione e resilienza con nitrurazione chimica.</i>	41
<i>Tab. VIII – Dati di velocità misurati in quattro distinti test arena.</i>	50
<i>Tab. IX – Parametri di confronto tra le tecnologie innovative in esame.</i>	54

1. INTRODUZIONE

Il comportamento meccanico di materiali strutturali perde la semplicità del modello costitutivo lineare non appena si abbandona il campo delle sollecitazioni elastiche. Le deformazioni plastiche e i grandi spostamenti dei punti di una struttura caricata oltre il limite elastico sono tutti descritti da modelli non lineari del materiale [1-2]. Queste considerazioni valgono per i carichi statici [3-4], la cui applicazione ha una durata molto maggiore del primo periodo proprio della struttura su cui agiscono. Quando la durata del carico agente su una struttura è comparabile con il suo primo periodo proprio [5] si innescano fenomeni di dinamica strutturale dei corpi rigidi. Invece, i carichi impulsivi, di durata molto inferiore al primo periodo proprio della struttura su cui agiscono, determinano il campo di studio degli impatti [6-7]. Quest'ultimo viene governato dal fenomeno di propagazione delle onde che può innescare meccanismi di perforazione del materiale [8].

Lo studio dei materiali in condizioni di elevato strain-rate e la dinamica degli impatti sono di grande importanza per le industrie che trattano sistemi di difesa avanzati. Si pensi agli studi di balistica interna e terminale necessari per la progettazione meccanica di un proiettile, oppure ai fenomeni di frammentazione degli stessi. Proprio su questi ultimi si concentra il presente lavoro di tesi, che ha l'obiettivo di verificare l'applicabilità di tecniche innovative per la frammentazione controllata. Con quest'ultima si intende la possibilità di predeterminare forma e dimensioni dei frammenti di un manufatto quando sottoposto a carichi impulsivi tipo un'esplosione. La frammentazione controllata è di particolare interesse nella progettazione di sistemi di difesa, poiché incrementa alcune prestazioni funzionali dei corpi proiettili. Questi incrementi risultano particolarmente efficaci per le munizioni guidate, dotate di una elevata precisione di ingaggio dei bersagli.

1.1 Testa in guerra

Viene definita testa in guerra (TIG) o in inglese *warhead* (WH) il carico pagante di proiettili di artiglieria, razzi e missili [9]. Tipicamente, la testa in guerra coincide con la sezione d'arma contenente la carica esplosiva principale. La Fig. 1 rappresenta, a titolo di esempio, la modellazione della sezione longitudinale di una comune testa in guerra per proiettili di artiglieria. Essa è rappresentativa dell'intera testa in guerra, avendo le TIG una geometria assial-simmetrica. La parte esterna in verde rappresenta il guscio (*shell*) metallico del proiettile, mentre la parte interna in giallo indica la carica esplosiva principale. Il punto rosso indica la zona di innesco della detonazione ad opera della spoletta. Infine, le sezioni di testa e coda sono schematicamente rappresentate in grigio in luogo rispettivamente di spoletta e fondello del proiettile.

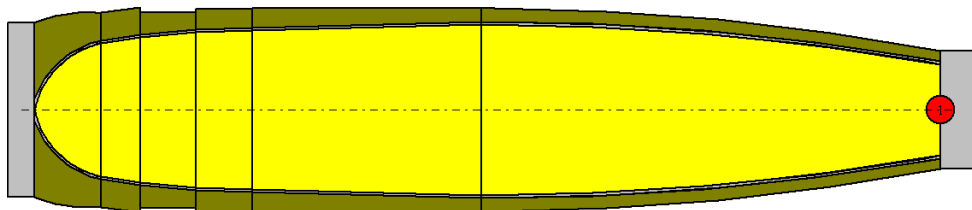


Fig. 1 – Schema della sezione longitudinale di una TIG per proiettile di artiglieria.

1.1.1. Classificazione

Escludendo l'ipotesi di danneggiare un generico bersaglio con impatto diretto del proiettile o missile su di esso, esistono due tipologie principali di testa in guerra, classificabili in base al fenomeno offensivo prevalente: TIG ad effetto *blast* e TIG a frammentazione. Nel primo caso, un generico bersaglio (*target*) viene investito e danneggiato da un'onda di shock (dovuta alla detonazione dell'esplosivo principale) caratterizzata da altissime pressioni. Nel secondo caso, il bersaglio viene impattato da numerosi frammenti (schegge) ad elevatissima velocità. Nella Fig. 2 tratta da [10] sono mostrati alcuni esempi di testa in guerra applicabili a proiettili di artiglieria o missili. A parte la TIG ad effetto *blast*, le altre sono tutte TIG il cui funzionamento si basa sulla proiezione di frammenti, schegge o dardi di carica cava contro il *target* (ovvero TIG a frammentazione). Alcune teste in guerra particolarmente complesse come le *cluster* sono di difficile adattamento a proiettili di artiglieria, mentre sono molto impiegate in soluzioni missilistiche.

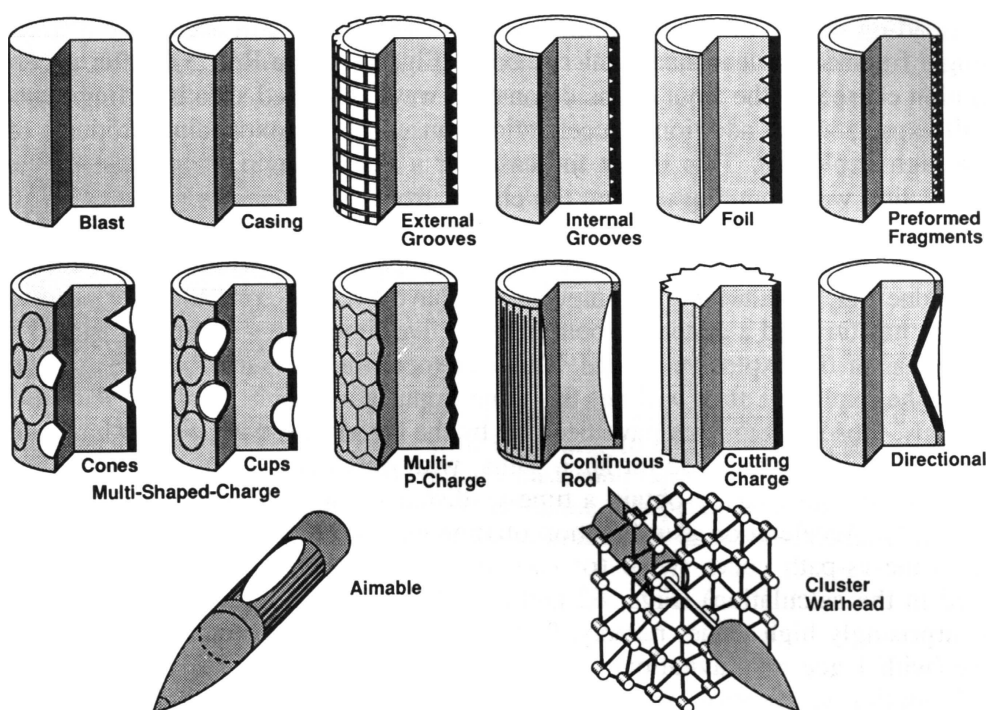


Fig. 2 – Esempi di TIG applicabili a proiettili di artiglieria o missili [10].

1.1.2. Progettazione

Durante l'esplosione di una testa in guerra, si creano sia effetti di *blast* che la frammentazione dello *shell*. Tuttavia, la progettazione di una testa in guerra è normalmente orientata a massimizzare un solo fenomeno a discapito dell'altro. In genere, le teste in guerra ad effetto *blast* vengono impiegate per arrecare danno a strutture come edifici, impianti, grosse macchine o veicoli corazzati. Esse hanno un raggio d'azione limitato e, quindi, è necessario far esplodere la testa in guerra in

prossimità del bersaglio. D'altra parte, le teste in guerra a frammentazione sono preferibili quando si ricerca un grande raggio di azione contro target poco corazzati o aventi punti deboli (come un aereo o un veicolo leggero). In ogni caso, la definizione della tipologia e delle caratteristiche del bersaglio di riferimento è fondamentale per orientare la progettazione di una testa in guerra verso la massimizzazione di alcune sue prestazioni. Contesti operativi generici e la molteplicità di bersagli complicano il progetto di una testa in guerra e generano soluzioni ibride che non massimizzano una specifica prestazione. Inoltre, le teste in guerra con soluzioni ibride non consentono confronti oggettivi delle prestazioni di una TIG.

Le prestazioni di una testa in guerra a frammentazione si esprimono, in prima approssimazione, fornendo il numero di perforazioni ottenibili per un intero angolo giro (360°) e le densità medie (numero di perforazioni per unità di superficie) su un pannello di caratteristiche note (materiale, spessore e distanza dalla testa in guerra). Queste prestazioni possono essere valutate attraverso esperimenti (prove di scoppio statico) e software dedicati (capaci anche di estrapolare i valori per condizioni di scoppio dinamico) [11-12]. Molti ricercatori hanno studiato la frammentazione a partire dagli anni Sessanta [13-15] e fino ai giorni nostri [16-18]. Diversi modelli sono stati proposti per simulare le teste in guerra a frammentazione [19-20]. La dinamica della frammentazione è strettamente legata al comportamento meccanico dei materiali al variare delle condizioni di temperatura [21-22] e velocità di deformazione [23-24]. In genere i materiali strutturali hanno un comportamento non lineare rispetto a questi parametri. Ne conseguono modelli meccanici del materiale particolarmente complessi.

1.1.3. Casing

La parte di testa in guerra che circonda l'esplosivo e genera schegge è detta casing. Esso deve rispondere a due requisiti principali: uno strutturale ed un altro legato alla letalità. Il materiale utilizzato per il casing è generalmente acciaio con caratteristiche meccaniche elevate: in molti casi viene impiegato il maraging, denominazione commerciale di acciai ad elevata resistenza meccanica ottenuti per precipitazione. Esistono tre tipi di casing: a frammentazione naturale, a frammentazione controllata (ottenuta con intagli [25-26] o altri sistemi [27]) e vettori di schegge preformate [28]. Un esempio di quest'ultimo tipo sono i casing con schegge in tungsteno interposte tra due pareti dello *shell* metallico della TIG. In questa soluzione, le schegge preformate tipicamente non hanno alcun compito strutturale per la testa in guerra. La Fig. 3 mostra un esempio di schegge preformate assemblate durante l'integrazione di una TIG a frammentazione tipo PFF (*Pre-Formed Fragments*).

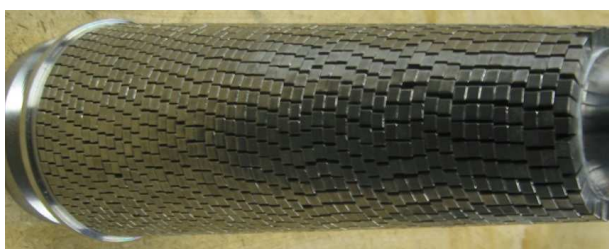


Fig. 3 – Schegge preformate per TIG a frammentazione tipo PFF.

I casing a frammentazione controllata spesso coincidono con sezioni della testa in guerra aventi compiti strutturali: per questo motivo, essi rappresentano un forte compromesso tra la resistenza strutturale e la letalità della testa in guerra stessa. La Fig. 4 riporta, a titolo di esempio, la schematizzazione di una testa in guerra complessa per proiettili di artiglieria sotto-calibrati. Sono esclusi dalla rappresentazione tutte le appendici aerodinamiche, sia di stabilizzazione che di controllo. I componenti in azzurro sono le schegge preformate in tungsteno che non svolgono compiti strutturali. Il resto dello *shell* in rosso può essere invece interessato (a seconda delle condizioni progettuali) da frammentazione naturale oppure controllata.

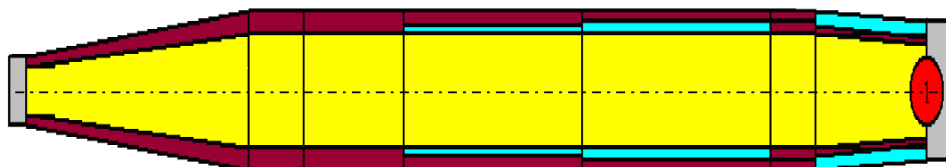


Fig. 4 – Schematizzazione di una TIG complessa per proiettili sotto-calibrati.

La progettazione di un proiettile d'artiglieria ed in particolare della testa in guerra è finalizzata a massimizzare la letalità su uno o più bersagli rispettando numerosi vincoli progettuali. I principali vincoli sono geometria e massa di *shell* ed esplosivo, la balistica interna ed esterna del proiettile, i requisiti di insensibilità e sicurezza del munizionamento agli stimoli esterni. Nel caso di proiettili sotto-calibrati, il diametro del casing è un compromesso tra requisiti di letalità e prestazioni (soprattutto gittata). In generale, per esigenze di letalità si preferiscono calibri grandi che danno sufficienti rapporti tra massa esplosivo e massa del casing; d'altra parte, aerodinamicamente a parità di altri fattori, la gittata è inversamente proporzionale al calibro del proiettile. La gittata è, inoltre, condizionata dal coefficiente di resistenza all'avanzamento del proiettile (C_x): eventuali frammentazioni controllate che peggiorino quest'ultimo devono essere valutate con particolare attenzione. La Fig. 5 tratta da [9] riporta un esempio di *shell* per testa in guerra a frammentazione controllata basata su intagli interni al casing. Questa soluzione non comporta aumenti del coefficiente di resistenza aerodinamico del proiettile.

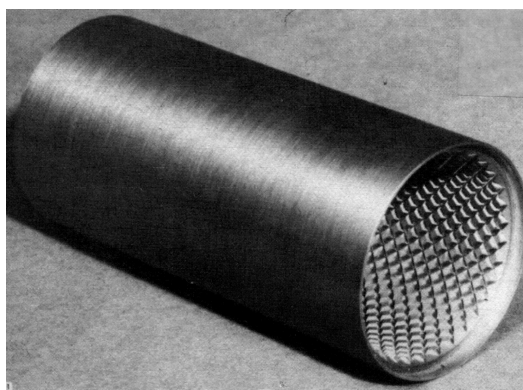


Fig. 5 – TIG a frammentazione controllata con intagli interni al casing [9].

1.2 Frammentazione Naturale

Le singole schegge che si formano dalla frammentazione di una testa in guerra sono caratterizzate dai seguenti parametri: forma, massa, materiale, velocità, punto di impatto, angolo di incidenza e numerosità. Una prima valutazione della velocità delle schegge per teste in guerra cilindriche è data dall'equazione di Gurney [29] in funzione del rapporto tra massa esplosivo e massa del casing:

$$V_0 = V_c \left(\frac{M}{C} + \frac{1}{2} \right)^{-0.5} \quad (1)$$

In essa, V_c è la velocità di Gurney (parametro caratteristico di ogni esplosivo), M è la massa del casing e C è la massa di esplosivo. Questa equazione è approssimata perché non considera gli effetti di bordo, i fenomeni di *gas leakage* e l'energia dell'esplosivo che si trasforma in *blast* e che viene impiegata per frammentare il casing. Esistono tuttavia software dedicati che considerano anche questi altri effetti nel calcolo della velocità delle schegge.

Un esempio di queste simulazioni è riportato in Fig. 6. Essa rappresenta l'andamento delle velocità iniziali delle schegge di una testa in guerra, generate dalla detonazione dell'esplosivo, in funzione della posizione longitudinale lungo la TIG. La simulazione riguarda una testa in guerra complessa formata da sezioni di varia geometria a frammentazione naturale o con schegge preformate. Si notano, quindi, le discontinuità tra sezioni di diversa natura.

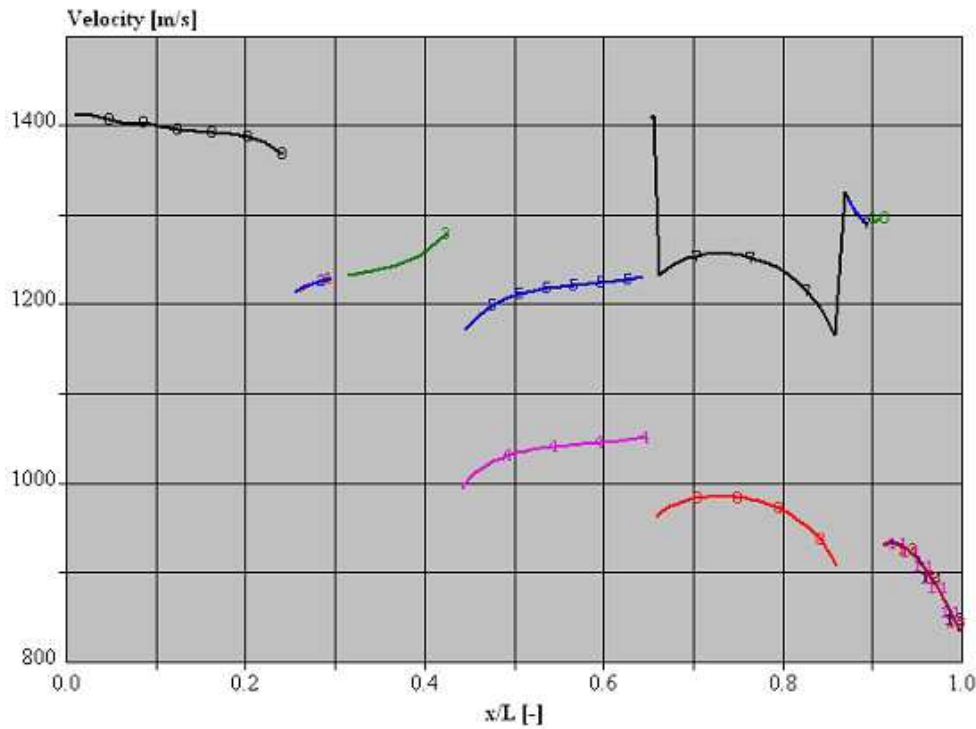


Fig. 6 – Velocità iniziali delle schegge di TIG complessa per proiettile di artiglieria.

1.2.1. Perdita di velocità in aria

Nello studio dei sistemi di controllo della frammentazione è fondamentale prendere in considerazione il fenomeno della perdita di velocità in aria soprattutto quando ci sono requisiti di letalità a distanze rilevanti dalla testa in guerra. La perdita di velocità in aria segue leggi esponenziali del tipo:

$$V = V_0 e^{-k s} \quad (2)$$

In essa, V è la velocità della scheggia alla distanza s , V_0 è la velocità iniziale della scheggia e k è un coefficiente così definito:

$$k = \frac{A \rho C_d}{2 m} \quad (3)$$

Il coefficiente k dipende dall'area della sezione frontale media della scheggia A , dalla densità dell'aria ρ e dal coefficiente di *drag* della scheggia C_d . La Fig. 7 mostra il decadimento di velocità nello spazio di schegge di varia massa a parità degli altri parametri.

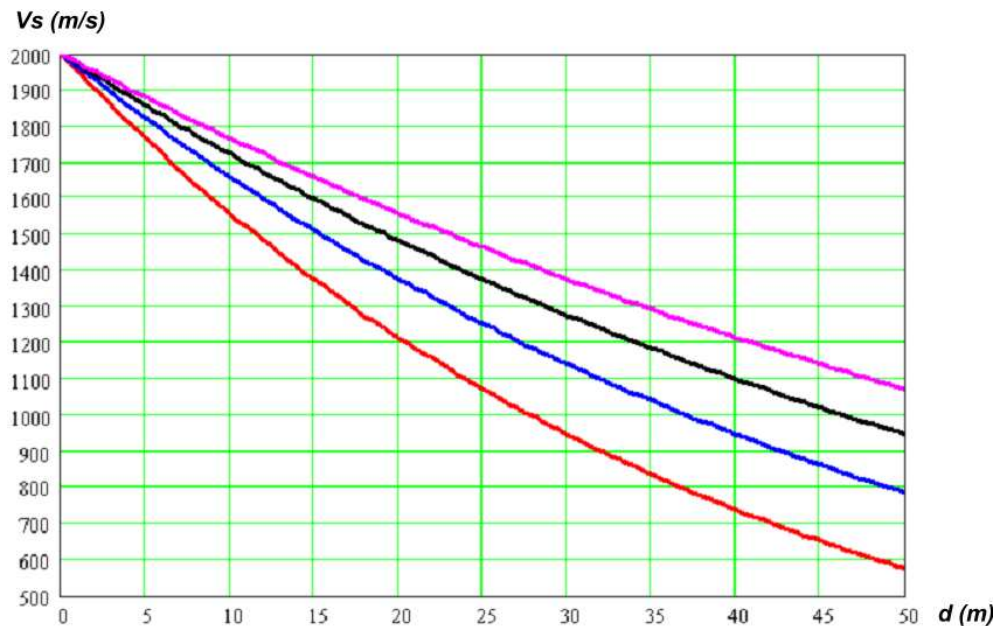


Fig. 7 – Andamento nello spazio delle velocità di schegge di varia massa.

Quindi, le prestazioni di una testa in guerra a frammentazione dipendono anche dalla forma delle schegge generate ed in particolare dal loro coefficiente di *drag*. Infatti, le schegge di forma irregolare (schiacciata o allungata) impattano contro il bersaglio a velocità sensibilmente inferiori rispetto a schegge di forma regolare. Inoltre, la forma irregolare peggiora la capacità di penetrazione a causa di una maggiore sezione frontale della scheggia.

La Tab. I tratta da [10] mostra i coefficienti di *drag* per alcune tipologie di schegge. Le schegge prodotte dalla frammentazione naturale e anche da alcune soluzioni di

frammentazione controllata presentano forme schiacciate ed allungate aventi dei coefficienti di *drag* fino a quattro volte superiori a quello di una scheggia sferica. Le conseguenze in termini di perdita di velocità in aria e, quindi, di prestazioni della testa in guerra sono notevoli. La valutazione degli effetti della resistenza aerodinamica sulle prestazioni di una testa in guerra è importante. Questa valutazione richiede, però, prove specifiche con l'impiego di bersagli a distanze notevoli dalla testa in guerra. Tale configurazione di prova è tipicamente più complicata e costosa di prove standard con bersagli posti a distanze minori dalla testa in guerra.

Forma	disegno	Cd
Cilindro allungato (long rod)		1.2
Sfera		0.47
Rod, faccia avanti		0.82
Disco, faccia avanti		1.17
Cubo, faccia avanti		1.05
Cubo, spigolo avanti		0.8
Parallelepipedo allungato, faccia avanti		2.05
Parallelepipedo allungato, spigolo avanti		1.55
Striscia sottile, faccia avanti		1.98

Tab. I – Coefficienti di drag per varie forme delle schegge di una frammentazione.

1.2.2. Esplosivo

Un ruolo importante nella dinamica della frammentazione di teste in guerra è quello dell'esplosivo, la causa prima della frammentazione stessa. La sua efficacia dipende fondamentalmente dalla quantità di energia disponibile e dalla velocità con cui questa viene rilasciata. Altri fattori importanti sono la potenza, il rapporto tra potenza e massa, la stabilità nel tempo e, infine, la bassa sensibilità agli stimoli energetici esterni (come impatto o frizione). Gli esplosivi comunemente impiegati per proiettili di artiglieria hanno velocità di detonazione quasi sempre superiore a 8000 m/s e pressione di detonazione intorno a 30 GPa. Gli esplosivi detonanti di nuova generazione (PBX, *Plastic Bonded Explosive*) hanno una bassissima sensibilità agli stimoli esterni, ottenuta inglobando cristalli di materiale esplosivo in sostanze leganti plastiche.

1.2.3. Distribuzione di massa

La frammentazione naturale viene studiata mediante modelli semiempirici che descrivono la distribuzione di massa delle schegge ottenute a seguito della frammentazione del materiale causata dall'esplosione. Il più importante parametro per descrivere una distribuzione di massa è il fattore $m_{1/2}$: esso rappresenta la massa del frammento che divide a metà la distribuzione di massa. Ovvero, data una distribuzione di massa delle schegge ottenute dalla frammentazione, la massa cumulativa percentuale maggiore o uguale a $m_{1/2}$ è pari al 50%.

La massa totale di un casing frammentato si distribuisce in più classi di massa intorno al fattore $m_{1/2}$ che può non essere la massa di scheggia più prestazionale. Non è facile massimizzare la prestazione di una testa in guerra per un determinato bersaglio. Quasi sempre si ha spreco di massa in schegge troppo piccole o troppo grandi rispetto al valore desiderato. In Fig. 8 sono riportate le scheggiature di alcuni proiettili di artiglieria che si possono trovare in letteratura. Si può osservare come per munizioni calibro 155 mm il 10% della massa produca circa il 70% del numero di schegge. Inoltre, per la stessa munizione, il 10% del numero di schegge (dal 90% al 100%) rappresenta il 70% della massa. Gli andamenti in Fig. 8 confermano che la frammentazione naturale disperde massa in numerose schegge molto piccole e poche schegge molto grandi.

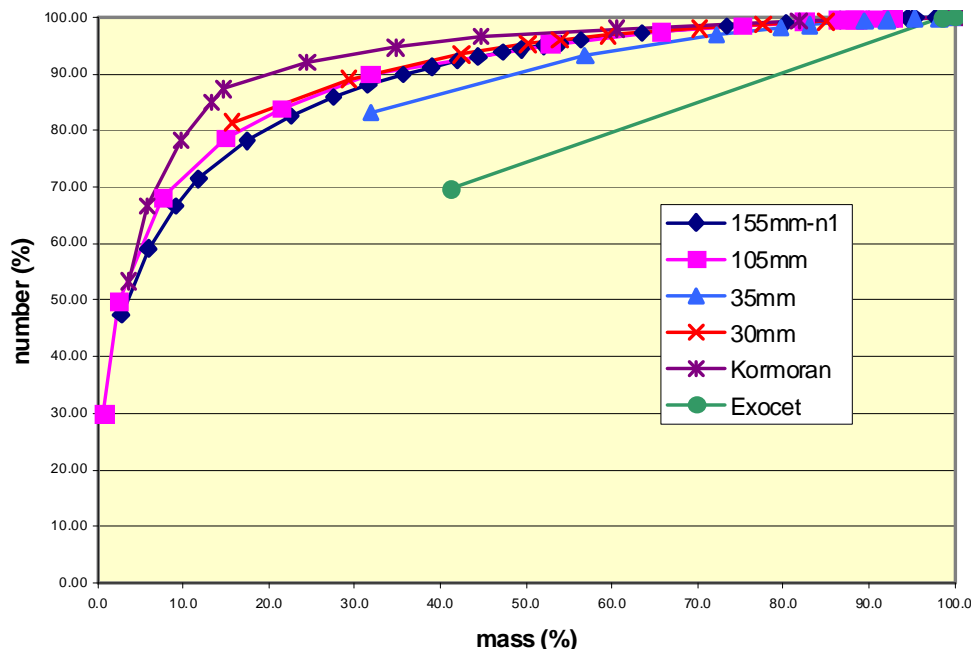


Fig. 8 – Confronto di scheggiature ottenute da diversi proiettili di artiglieria.

Definito il parametro $m_{1/2}$ la distribuzione di massa può essere descritta da diverse leggi [30]. Le principali curve di distribuzione di massa sono quella Esponenziale, quella di *Mott*, quella di *Payman* e quella Logaritmica Normale. Nelle Fig. 9 e 10 sono confrontate le diverse leggi elencate in termini rispettivamente di densità di probabilità e cumulative normalizzate.

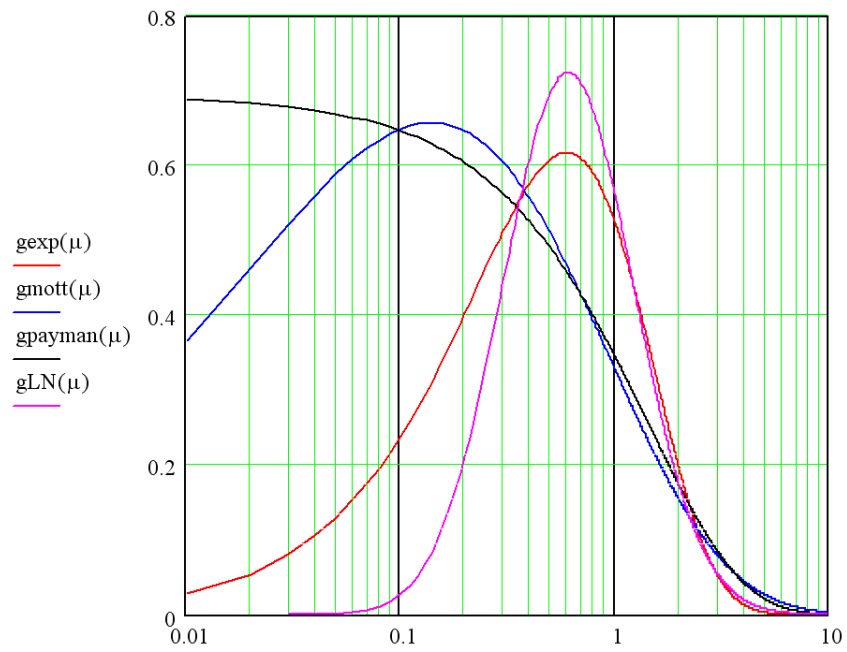


Fig. 9 – Densità di probabilità di diverse leggi di distribuzione di massa..

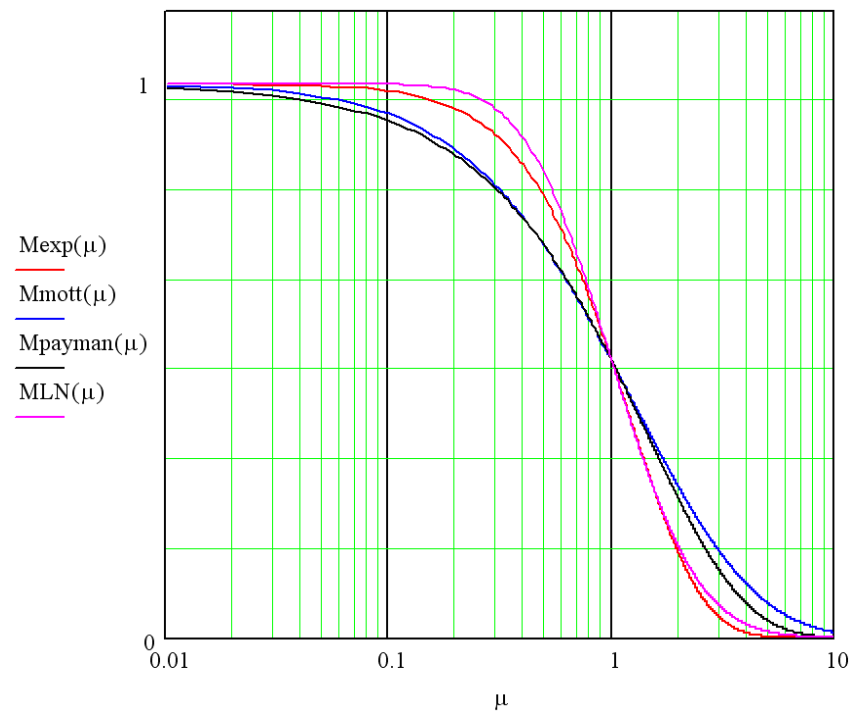


Fig. 10 – Cumulative normalizzate di diverse leggi di distribuzione di massa.

Uno dei difetti della frammentazione naturale è la formazione di schegge irregolari, schiacciate ed allungate che presentano alti coefficienti di *drag* in aria e grandi aree medie di impatto con conseguenti basse prestazioni, soprattutto a distanze notevoli. In Fig. 11 tratto da [10] è riportato un esempio di frammentazione naturale con elevate prestazioni poiché mancano schegge particolarmente irregolari e allungate. Invece, la Fig. 12 riporta un esempio tipico di impatto di schegge prodotte da frammentazione naturale che per forme eccessivamente irregolari e allungate non riescono a perforare il bersaglio.

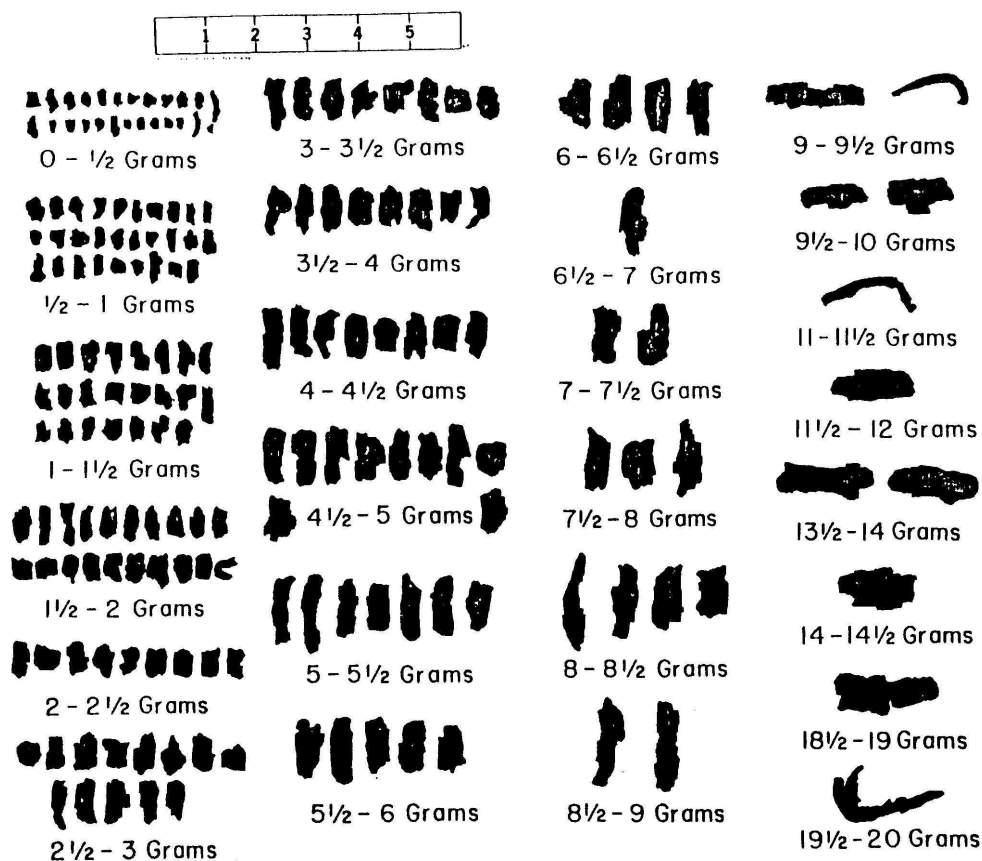


Fig. 11 – Esempio di scheggiatura derivante da frammentazione naturale [10].



Fig. 12 – Esempio di impatti di schegge derivante da frammentazione naturale.

2. FRAMMENTAZIONE CONTROLLATA

Per ottenere schegge di forma e massa desiderate è necessario controllare e guidare la frammentazione della testa in guerra. Questo è possibile indebolendo localmente il casing senza ridurre la resistenza strutturale complessiva della testa in guerra. Quindi, il controllo della frammentazione di teste in guerra è un compromesso tra i vincoli strutturali, i requisiti prestazionali e l'indebolimento del casing. I principali vincoli progettuali sono il calibro esterno, le sollecitazioni dinamiche, la geometria assialsimmetrica, il diametro dell'esplosivo e la richiesta di assenza di discontinuità longitudinali. Per poter studiare i metodi di controllo della frammentazione è necessario descrivere i principali meccanismi alla base della formazione di fratture a seguito della detonazione di esplosivo nelle teste in guerra.

2.1 Teoria della frattura

Il controllo della frammentazione si basa su due meccanismi di frattura conseguenti alla detonazione [31]: quello per onde di shock e quello meccanico classico. Questi due meccanismi normalmente coesistono nei fenomeni di detonica, ma in molti casi uno può prevalere sull'altro con evidenti segni di ciò nella frammentazione. In realtà, il fenomeno della frattura di corpi solidi si basa globalmente sulla teoria di propagazione delle onde nel materiale. Tuttavia, particolari condizioni come la geometria del corpo evidenzia alcuni aspetti fenomenologici a discapito di altri.

2.1.1. Propagazione delle onde di shock

Il meccanismo di frattura per onde di shock si basa sulla propagazione di onde di compressione all'interno del casing. Queste onde, prodotte dalla detonazione, viaggiano all'interno del casing e non producono effetti di rottura; quando arrivano alla superficie esterna vengono riflesse verso l'interno come onde di trazione. Se il casing presenta delle discontinuità le onde si incrociano creando delle zone con altissime tensioni di trazione che originano fratture. Questo meccanismo è evidente nel caso di detonazione di un casing a profilo esagonale (Fig. 13 tratta da [9]) in cui le fratture partono dagli spigoli dell'esagono e rompono il casing in sei parti.

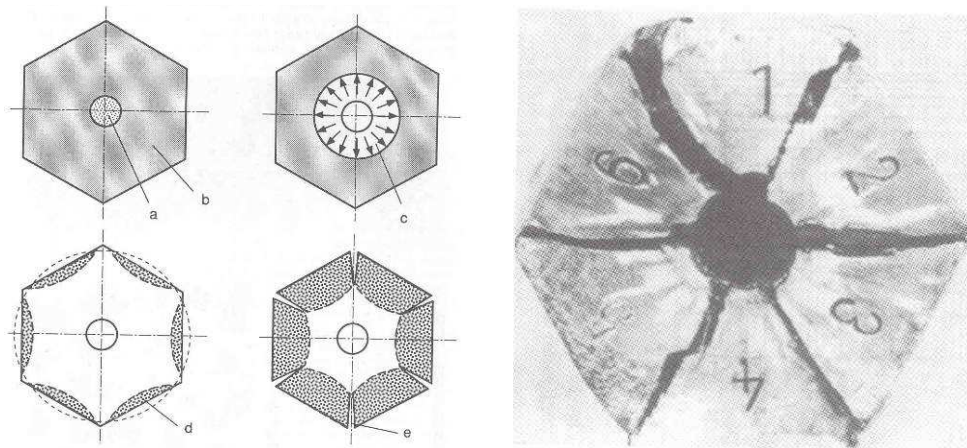


Fig. 13 – Esempio di frattura per onde di shock [9].

Questo meccanismo produce fratture *random* nei casing a frammentazione controllata mediante intagli esterni e porta a risultati distanti dalle simulazioni (che si basano solo sui meccanismi classici di frattura). La propagazione di onde di shock all'interno del casing può anche portare a fratture per *spalling* se il materiale è particolarmente fragile [32-34]. L'impiego del meccanismo di frattura per onde di shock su proiettili d'artiglieria risulta poco vantaggioso, poiché implica un aumento della resistenza aerodinamica del proiettile essendo questo dotato di superfici esterne a profilo irregolare.

2.1.2. Teoria meccanica classica

Secondo il meccanismo di frattura meccanico classico, dato un casing cilindrico, esistono due tipologie principali di frattura (Fig. 14): fratture per tensioni radiali, originate in prossimità della superficie esterna, e fratture di taglio, che normalmente si originano nella zona interna del casing [35]. Il rapporto tra la distribuzione di queste due tipologie di fratture dipende da vari fattori legati al tipo di casing (dimensioni, diametro, materiale) e al tipo di esplosivo. Normalmente le fratture si dividono egualmente tra le due tipologie: tuttavia, alcuni test di scoppio statico svolti hanno mostrato che per i tipi di casing utilizzati nelle munizioni della famiglia Vulcano la tipologia predominante è quella con fratture di taglio, che si propagano nel casing con angoli di circa 45° rispetto alle superfici.

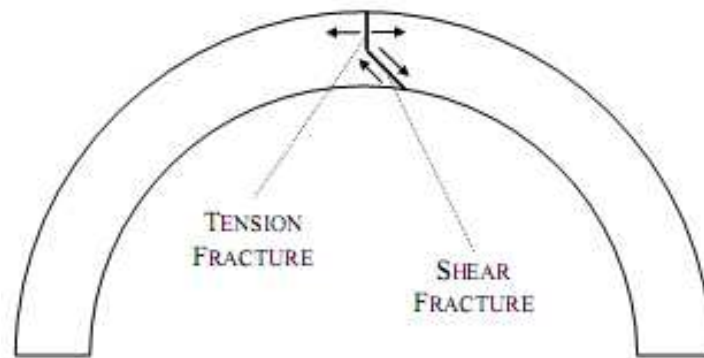


Fig. 14 – Fratture di trazione e taglio.

La maggior parte dei sistemi di controllo della frammentazione si basano sul meccanismo di frattura meccanico classico: si realizzano zone più deboli e concentrazioni di tensione da cui parte la frattura. Tecnicamente esistono numerosi approcci possibili per ottenere questo obiettivo. Innanzi tutto, si può intervenire sul casing (all'esterno, all'interno o su tutto lo spessore) con variazioni della geometria come asportazioni, tagli, forature o deformazioni plastiche, oppure con alterazioni della struttura per mezzo di trattamenti termici o chimici. Inoltre, si può intervenire sull'esplosivo attraverso intagli esterni, elementi inerti inglobati oppure detonazioni controllate. Infine, si può agire interponendo degli elementi preformati tra casing ed esplosivo.

2.1.3. Linee di frattura

Dalla radice di un intaglio a V simmetrico possono propagare due fratture di taglio ortogonali tra loro. Entrambe seguono la direzione di massimo taglio, posta a 45° rispetto alle generatrici cilindriche del casing. Per questo motivo, tali direzioni sono dette linee di frattura primarie. Invece, dalla radice di un intaglio a V asimmetrico con spigolo vivo può propagare soltanto un danneggiamento che correrà lungo una linea di frattura primaria.

Tuttavia, non è semplice realizzare un intaglio a V asimmetrico con spigolo vivo o raggio di raccordo molto più piccolo dello spessore del casing (quindi, trascurabile). In questi casi, un'altra frattura ortogonale alla prima può propagare. Questa ha un diverso grado di danneggiamento e per tale motivo è detta linea di frattura secondaria. Questo fenomeno è rappresentato schematicamente nelle Fig. 15 e 16 a seguire tratte da [9].

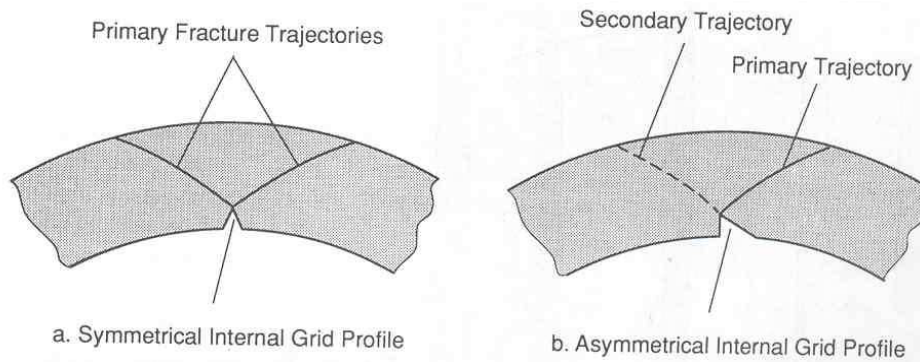


Fig. 15 – Linee di frattura primarie e secondarie [9].

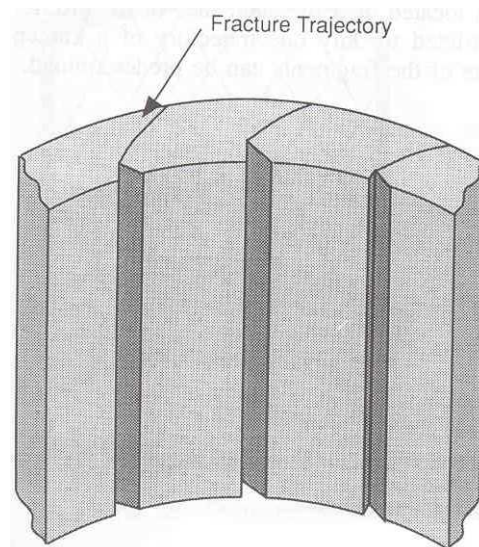


Fig. 16 – Effetto sulla frammentazione di intagli asimmetrici [9].

La nascita di linee di frattura secondarie genera due effetti negativi schematizzati nelle figure a seguire. Innanzi tutto, nel casing si crea una zona (quella esterna) a frammentazione non controllata (vedi Fig. 17). Inoltre, le schegge pre-frammentate hanno massa notevolmente inferiore a quella teorica attesa (vedi Fig. 18).

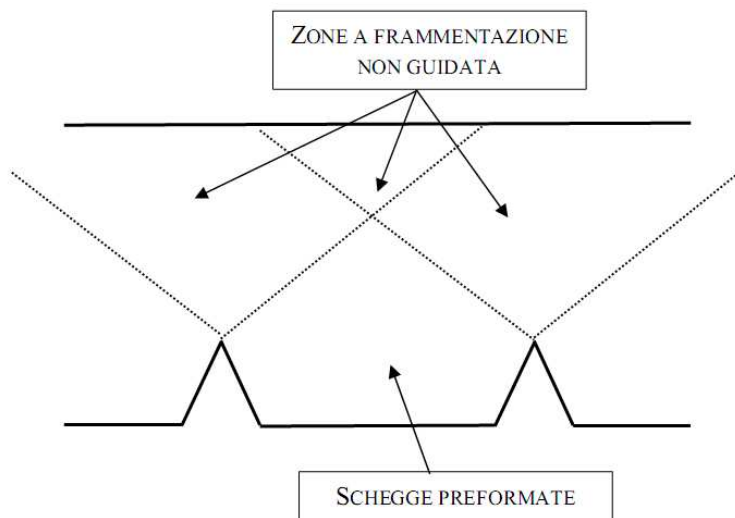


Fig. 17 – Formazione di schegge controllate.

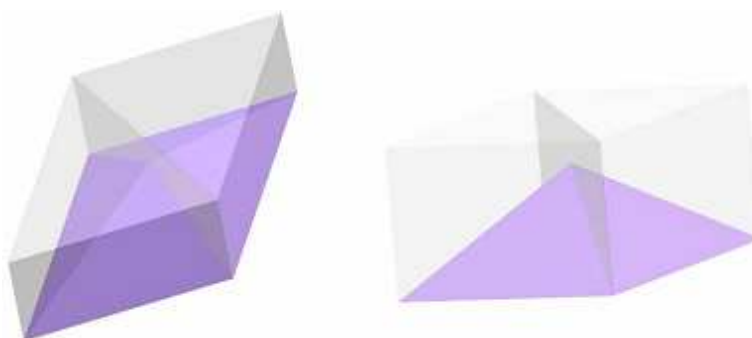


Fig. 18 – Scheggia teorica (grigio) e scheggia effettiva (viola).

Tecnologicamente è molto difficile realizzare raggi di raccordo limitati su materiali altamente resistenti e duri come l'acciaio maraging. Le esperienze effettuate sui proiettili DART e della famiglia Vulcano hanno mostrato che con intagli asimmetrici di raggio di raccordo minimo le linee di frattura secondarie si presentano nel 90% delle schegge raccolte. Questo non giustifica la complicazione tecnologica della ricerca di un intaglio asimmetrico.

2.2 Stato dell'arte

I metodi di intaglio tradizionali non danno una sufficiente capacità di controllo della frammentazione unita alla garanzia di robustezza finale della testa in guerra. Occorre scendere in profondità con gli intagli per essere sicuri di guidare la frammentazione e minimizzare la porzione di casing a frammentazione naturale. Questo è l'obiettivo delle tecniche di controllo della frammentazione innovative. Tale obiettivo è raggiungibile in due modi: attraverso una frammentazione con sole linee di frattura primarie, oppure con un indebolimento più performante del casing. Nel primo caso è necessario non attivare linee di frattura secondarie per non alterare il meccanismo di controllo della frammentazione progettato. Nel secondo caso vanno comunque rispettati i limiti strutturali complessivi della testa in guerra. Oggi i sistemi più utilizzati per il controllo della frammentazione si basano su intagli esterni o interni nel casing, su intagli nell'esplosivo oppure su tecniche di infragilimento localizzato del casing.

2.2.1. Intagli esterni

La tecnica degli intagli esterni nel casing ha una efficacia legata alla profondità degli intagli stessi: essa risulta buona per profondità di almeno il 50% dello spessore del casing. La formazione delle schegge è complicata dalle fratture che si generano per effetto della propagazione di onde di shock. I parametri di questa tecnica sono il profilo dell'intaglio e l'angolo di salita degli elicoidi [36]. È una tecnica di semplice realizzazione e medio impatto economico. Tuttavia, essa comporta un aumento della resistenza aerodinamica dei proiettili. La Fig. 19 riporta un esempio di casing con intagli esterni per testa in guerra a frammentazione controllata di proiettili di artiglieria.



Fig. 19 – Casing con intagli esterni per TIG a frammentazione controllata.

2.2.2. Intagli interni

Gli intagli interni nel casing hanno anch'essi un'efficacia legata alla profondità: tuttavia, si stima una buona efficacia degli stessi già con una profondità pari al 30% dello spessore del casing. La formazione delle schegge non è influenzata dalla propagazione di onde di shock [37]. Questa tecnica ha come parametri l'angolo di salita degli elicoidi ed il profilo dell'intaglio (anche di tipo asimmetrico). È una tecnica economica, di facile realizzazione e non comporta effettivi negativi sul drag.

Ha come unico inconveniente la necessità di opportune protezioni antifrizione contro l'arroccamento dell'esplosivo nelle teste in guerra con elevate accelerazioni di lancio. La Fig. 20 mostra un esempio di testa in guerra a frammentazione controllata con intagli interni al casing.



Fig. 20 – TIG a frammentazione controllata con intagli interni al casing.

2.2.3. Intagli sull'esplosivo

Un'altra tecnologia di frammentazione controllata si basa su *groove* applicate alla superficie esterna dell'esplosivo [38]. Con questa tecnica si crea un effetto carica cava da cui consegue la frattura localizzata del casing. Tipicamente, gli intagli creati nell'esplosivo sono riempiti con del *liner* protettivo. Questa tecnologia è efficace solo su teste in guerra di grande calibro (ad esempio, di siluri o missili). Nel caso di teste in guerra con calibro ridotto (come quelle dei proiettili di artiglieria) le *groove* non possono essere troppo profonde: ciò aumenta il costo della tecnologia senza vantaggi tangibili negli effetti della frammentazione. La Fig. 21 tratta da [9] riporta una schematizzazione di questa tecnica.

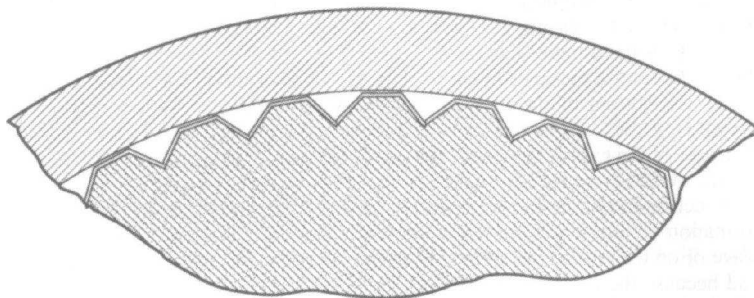


Fig. 21 – Schema di frammentazione controllata con intagli esterni sull'esplosivo.

2.2.4. Trattamento localizzato

Alcuni trattamenti chimici e termici sono impiegati per creare zone fragili nel casing e conseguentemente controllarne la frammentazione. I trattamenti chimici aumentano la durezza superficiale del casing introducendo elementi chimici nella struttura cristallina metallica del casing. Esistono diversi trattamenti chimici (ad esempio, la cementazione e la nitrurazione) e la loro efficacia dipende dalla composizione chimica del materiale del casing. D'altra parte, i trattamenti termici consentono di aumentare la durezza dei metalli (ad esempio con la tempra) o di ridurre la loro resistenza tramite ricottura. Tutti questi trattamenti scendono a profondità limitate (qualche millimetro) e quindi non sono applicabili a teste in guerra con elevati spessori. Sia i trattamenti chimici che quelli termici del casing non aumentano la resistenza aerodinamica della testa in guerra e sono relativamente economici.

In studi svolti relativamente alla munizione DART è stato provato il meccanismo di controllo della frammentazione mediante micro-foratura laser (tecnologia ibrida tra l'asportazione di materiale ed il trattamento termico). Con essa si realizzano una serie di micro-fori sulla superficie esterna del casing che lo indeboliscono meccanicamente come un intaglio ad elevata profondità. I parametri di questa tecnologia sono il tipo di laser scelto ed il percorso di micro-foratura eseguito. Questa tecnica è risultata essere molto efficace ma anche caratterizzata da costi notevoli. La Fig. 22 mostra un esempio e un dettaglio di applicazione della tecnologia di micro-foratura laser.

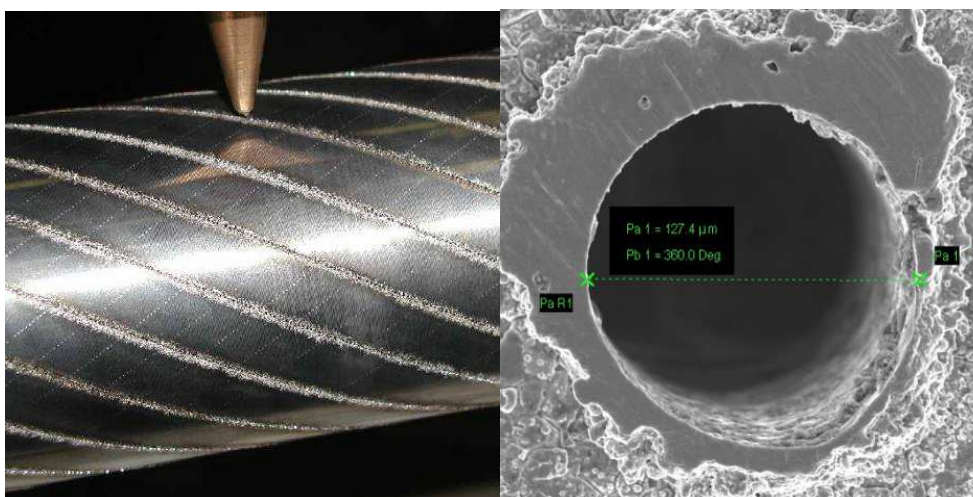


Fig. 22 – Studio di micro-foratura laser.

3. RICERCA DEL SISTEMA DI CONTROLLO DELLA FRAMMENTAZIONE

La ricerca di una tecnica di controllo della frammentazione non può prescindere dalla definizione di una testa in guerra di riferimento: infatti, su TIG differenti possono essere applicate con successo tecniche diverse. Per questo lavoro si è scelto di prendere come riferimento la testa in guerra del proiettile sotto-calibrato Vulcano. Con questa scelta si sono fissati diversi parametri che intervengono nello studio comparativo: la geometria e le proprietà del casing e dell'esplosivo, le condizioni di carico e di vincolo della testa in guerra allo sparo, nonché tutte le caratteristiche del *target* di riferimento.

Per ovvi motivi di riservatezza industriale i dati sensibili inerenti la munizione Vulcano non possono essere resi pubblici. Perciò in questo lavoro verranno omessi i valori numerici di riferimento e tutti i risultati saranno presentati in forma adimensionalizzata.

3.1 Modelli di simulazione

Sono stati creati una serie di modelli per simulare sia la frammentazione naturale della TIG di riferimento, sia la frammentazione controllata delle tecniche innovative da indagare. La TIG di riferimento è stata valutata per le prestazioni sul *target* di riferimento e con un'analisi strutturale per valutare gli effetti di indebolimento.

3.1.1. Frammentazione naturale

Dapprima è stato riprodotto e simulato negli ambienti Split-X® [39] e Autodyn® [40] il comportamento con frammentazione naturale della testa in guerra di riferimento. In questo modo si vuole costruire un modello software i cui parametri saranno affinati dopo il confronto con i risultati sperimentali. Come esempio di risultato di queste simulazioni viene riportato in Fig. 23 l'andamento delle velocità iniziali delle schegge al variare della posizione longitudinale lungo la testa in guerra.

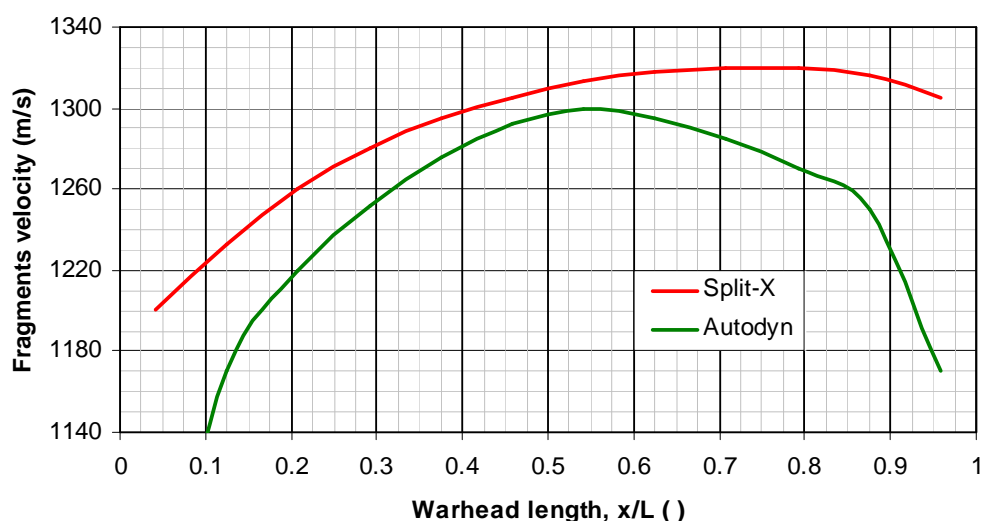


Fig. 23 – Velocità iniziale delle schegge simulata per la frammentazione naturale.

La simulazione con Split-X mostra che gli effetti di bordo sono maggiori nella zona di innesco ($x/L=0$) piuttosto che all'altra estremità della testa in guerra. La simulazione con Autodyn, invece, genera un profilo di velocità coerente con quello di Split-X, ma con valori assoluti inferiori. Questi strumenti software hanno permesso di ricavare un altro dato importante come raffronto: la massa minima di scheggia in grado di perforare il target di riferimento.

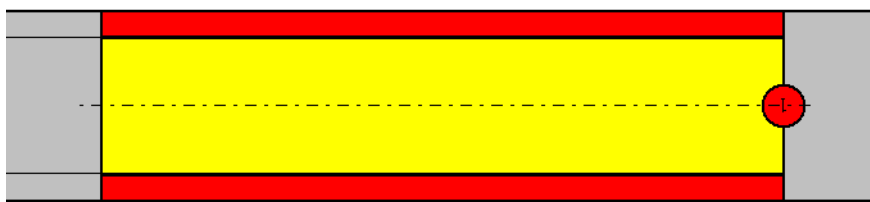


Fig. 24 – Modello Split-X della testa in guerra a frammentazione naturale.

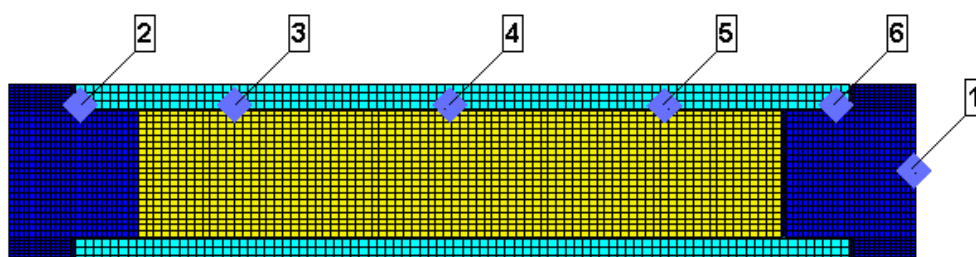


Fig. 25 – Modello Autodyn della testa in guerra a frammentazione naturale.

Le Fig. 24 e 25 rappresentano una schematizzazione dei modelli di testa in guerra a frammentazione naturale che sono stati creati negli ambienti Split-X e Autodyn rispettivamente. Lo schema del modello Autodyn indica anche i punti di controllo impostati nella simulazione. L'andamento temporale delle velocità di tali punti (detti *gauge points*) è riportata in Fig. 26.

Le Fig. da 27 a 29, invece, riportano i profili di velocità assoluta delle schegge in formazione secondo il modello Autodyn a diversi istanti. Gli istanti scelti sono rispettivamente 10 μ s, 20 μ s, 30 μ s e 104 μ s (quest'ultimo coincide con l'istante di fine simulazione).

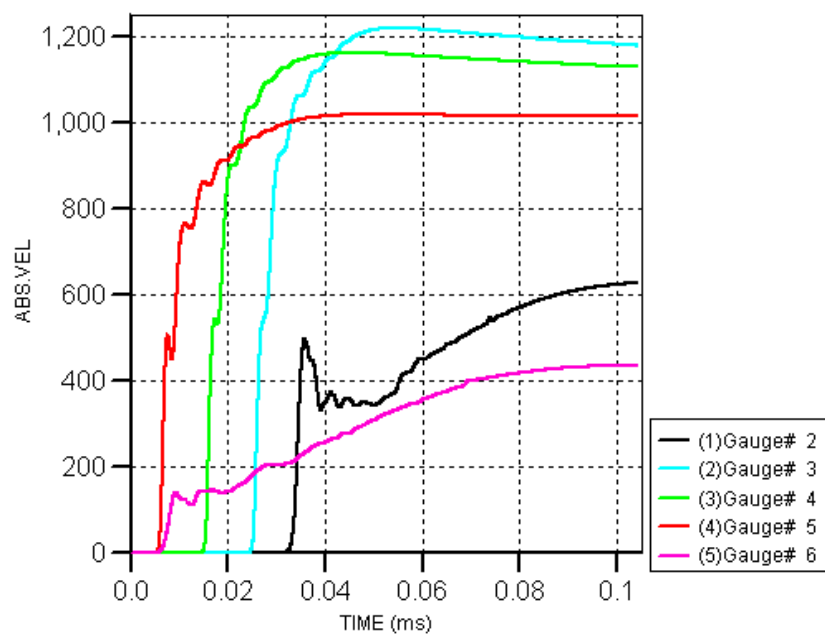


Fig. 26 – Andamento temporale delle velocità assolute per i punti di controllo.

AUTODYN-2D v6.0 from Century Dynamics

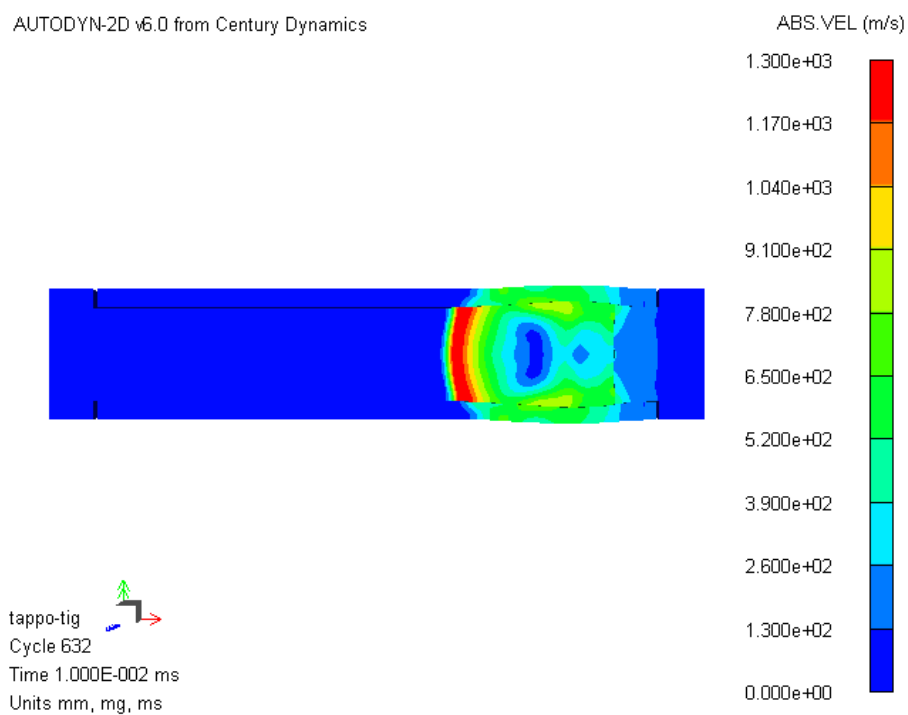
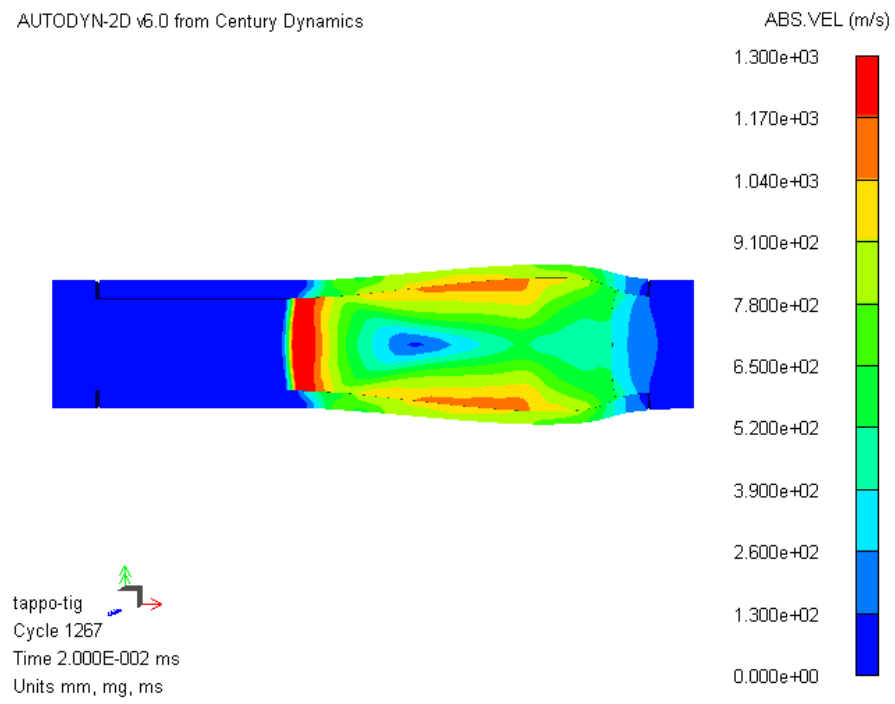


Fig. 27 – Profilo di velocità delle schegge in formazione a 10 μ s (Autodyn).

AUTODYN-2D v6.0 from Century Dynamics



AUTODYN-2D v6.0 from Century Dynamics

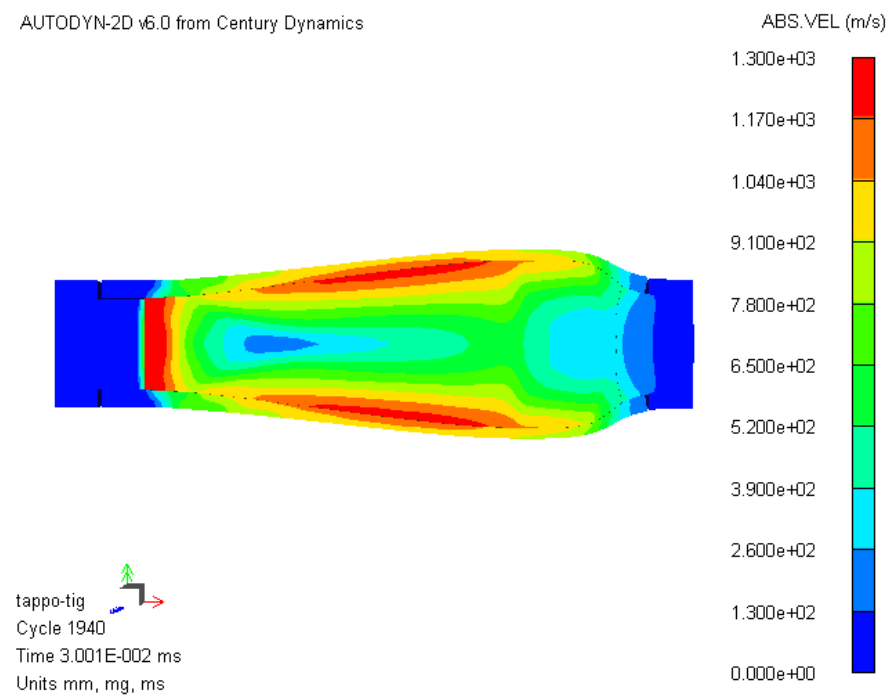


Fig. 28 – Profilo di velocità delle schegge formate a 20 μ s e 30 μ s (Autodyn).

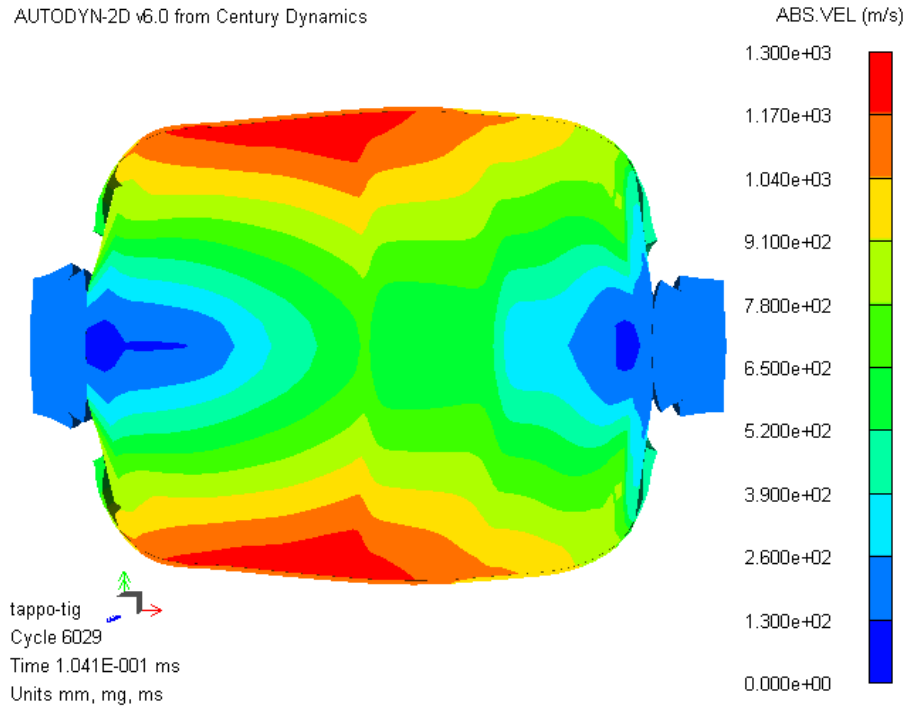


Fig. 29 – Profilo di velocità delle schegge formate a $104 \mu\text{s}$ (Autodyn).

3.1.2. Analisi prestazionale

In un secondo momento, è stata impostata in ambiente Split-X un'analisi prestazionale della testa in guerra a frammentazione naturale. Questa analisi si basa sulla legge di perdita di velocità in aria delle schegge (2) e sul modello di penetrazione THOR [41]. Quest'ultimo descrive la penetrazione di una scheggia attraverso uno specifico bersaglio di materiale e spessore noti. In particolare, le seguenti equazioni rappresentano la massa e la velocità della scheggia dopo la penetrazione:

$$m_r = m - 10^{a_1} \left(f t \sqrt[3]{m^2} \right)^{a_2} m^{a_3} \left(\frac{1}{\cos \theta} \right)^{a_4} V^{a_5} \quad (4)$$

$$V_r = V - 10^{b_1} \left(f t \sqrt[3]{m^2} \right)^{b_2} m^{b_3} \left(\frac{1}{\cos \theta} \right)^{b_4} V^{b_5} \quad (5)$$

In queste equazioni m e V sono la massa e la velocità della scheggia impattante, t rappresenta lo spessore del *target*, f e θ sono invece rispettivamente il fattore di forma della scheggia e l'angolo di impatto. Infine, i coefficienti a_i e b_i sono una serie di parametri tipici per ogni materiale.

L'analisi prestazionale ha dapprima verificato che tutte le schegge prodotte dalla frammentazione naturale fossero in grado di perforare il *target* di riferimento. Questi risultati sono visibili in Fig. 30 dove è riportato l'andamento della capacità di perforazione delle schegge per bersagli a diverse distanze dalla testa in guerra. In figura sono rappresentati sia la perforazione che il valore di riferimento richiesto. Poiché il bersaglio di riferimento è posto ad una distanza notevole dalla testa in guerra, sono state scelte due distanze equivalenti da prendere in considerazione. Queste sono distanze maggiormente ragionevoli, che hanno consentito una più facile organizzazione del *layout* di prova sperimentale.

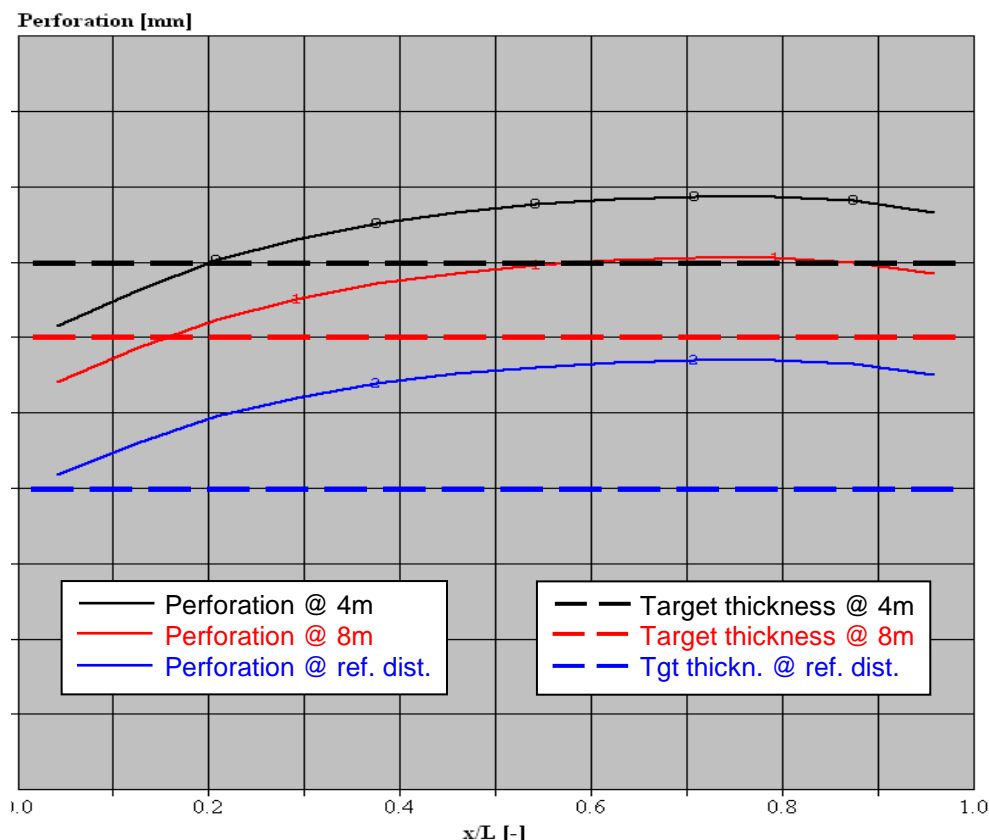


Fig. 30 – Andamento della capacità di perforazione per diverse distanze dalla TIG.

Gli andamenti di Fig. 30 mostrano che alle distanze equivalenti fissate le schegge formate nella zona di inizio detonazione non rispettano il requisito di perforazione. Tuttavia, viene trascurato questo particolare legato agli effetti di bordo della frammentazione.

La Fig. 31, invece, riporta l'andamento lungo l'asse longitudinale del casing della capacità di perforazione delle schegge per il bersaglio di riferimento posto a 4 m dalla testa in guerra. I risultati delle simulazioni sono rappresentati per varie masse delle schegge. Ovviamente, al crescere della massa delle schegge aumenta la capacità di perforazione contro il medesimo bersaglio.

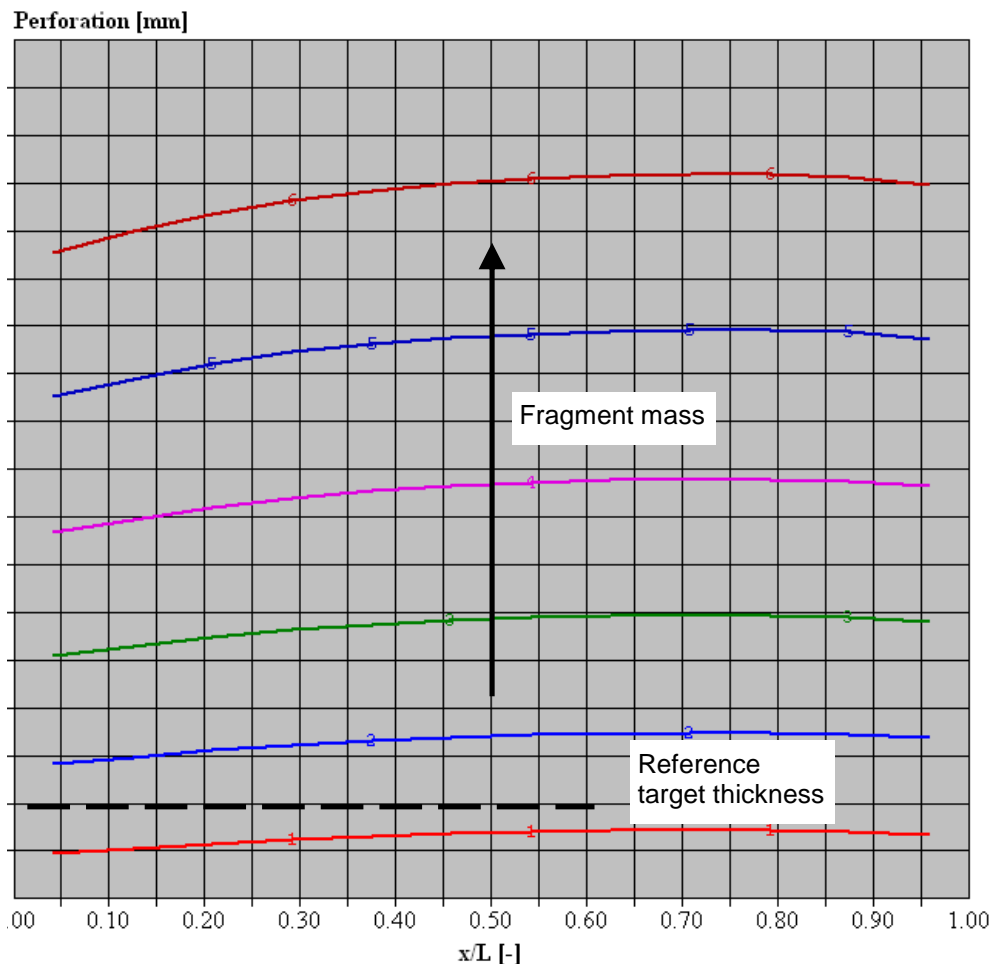


Fig. 31 – Capacità di perforazione per schegge di diversa massa a 4 m dalla TIG.

La Fig. 32 riporta un altro importante risultato dell'analisi prestazionale della testa in guerra di riferimento. In essa è rappresentato l'andamento della capacità di perforazione delle schegge al variare della distanza del bersaglio dalla testa in guerra. Gli andamenti si riferiscono a diverse simulazioni fatte al variare della massa delle schegge. Per omogeneizzare i risultati, il grafico si riferisce all'ipotesi di schegge con la medesima velocità iniziale. Inoltre, si considerano sempre gli stessi spessore e materiale per il bersaglio in esame.

L'asse delle ascisse della Fig. 32 riporta un largo range delle distanze tra bersaglio e testa in guerra. Tuttavia, questi valori sono tipici per proiettili di artiglieria a frammentazione molto prestazionali. Ovviamente, nel conseguimento di un'alta prestazione del complesso munizione è necessario considerare la precisione di ingaggio del proiettile. Questa viene notevolmente incrementata con proiettili guidati, in grado tra l'altro di raddoppiare quasi la gittate dell'omologo munizionamento convenzionale.

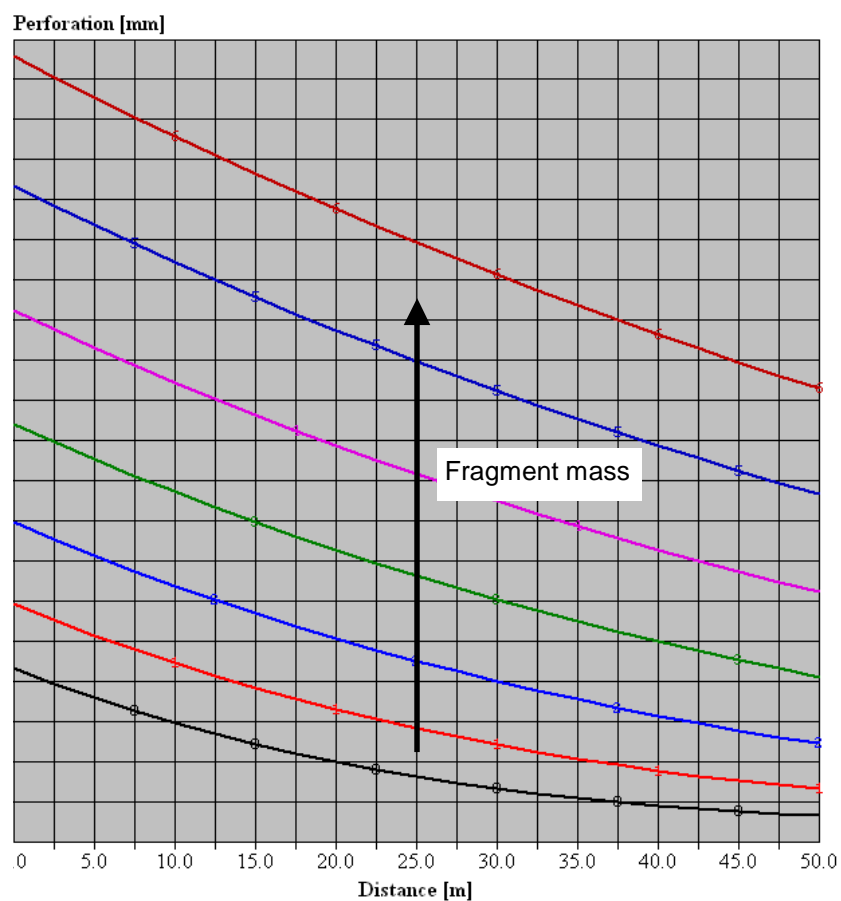


Fig. 32 – Perforazione in funzione della distanza per schegge di diversa massa.

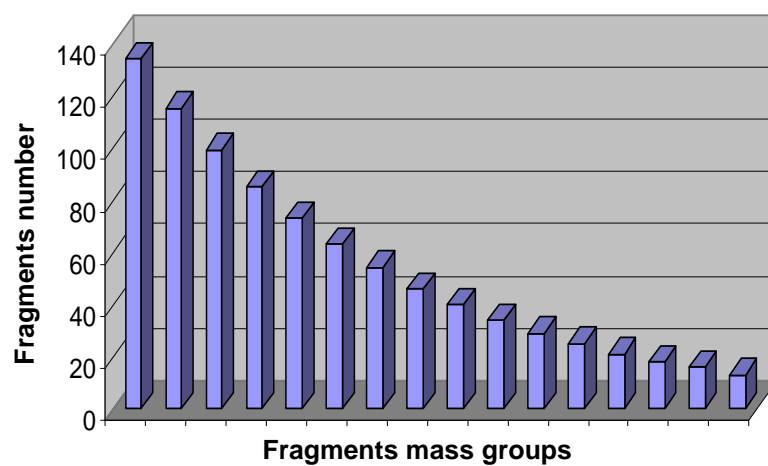


Fig. 33 – Simulazione della distribuzione di massa per frammentazione naturale.

3.1.3. Analisi strutturale

Successivamente, si è proceduto a riprodurre in ambiente Ansys® [42] la testa in guerra di riferimento al fine di impostarne un modello di analisi strutturale. Data la semplicità costruttiva della testa in guerra a frammentazione naturale è stato creato un modello bi-dimensionale di tipo assial-simmetrico. Per il materiale del casing è stato adottato un modello elasto-plastico esponenziale. Il modello, inoltre, considera anche altre non linearità quali l'attrito tra le diverse parti della testa in guerra e l'opzione grandi spostamenti e grandi deformazioni. In Fig. 29 viene riportato l'andamento della tensione equivalente di *Von Mises* nello spessore del casing che deriva dall'analisi strutturale simulando le condizioni della testa in guerra allo sparo. Queste ultime sono il carico inerziale proprio e delle parti collegate, e la pressione radiale e longitudinale (dovuta al fatto che la testa in guerra si trova all'interno della camera polveri della bocca da fuoco).

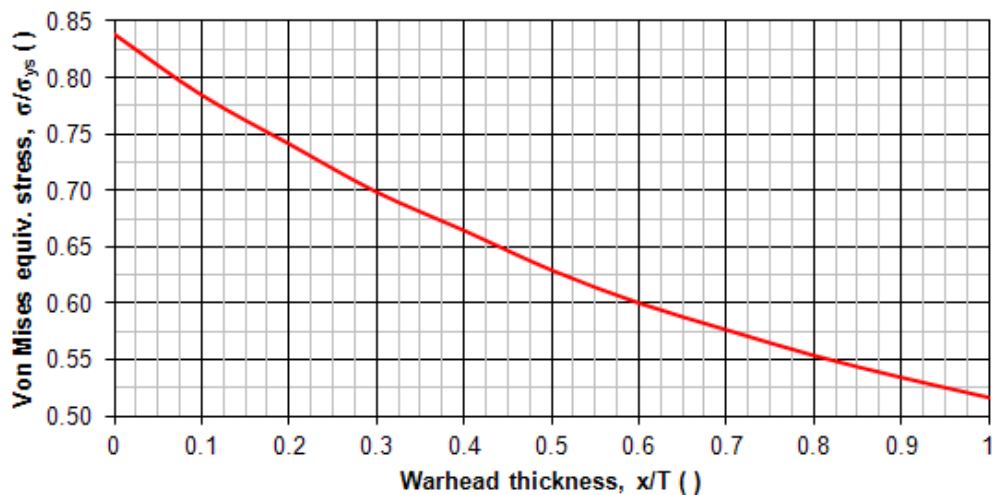


Fig. 34 – Tensione equivalente di *Von Mises* nello spessore della TIG allo sparo.

Confrontando questi risultati con le caratteristiche meccaniche del materiale del casing si evince che quest'ultimo sopporterebbe una riduzione di spessore pari al 15% senza superare il limite di resistenza elastico. Questo parametro è un vincolo fondamentale nella definizione delle variabili delle tecnologie di controllo della frammentazione. Infatti, le stesse sono state studiate imponendo questo limite di indebolimento strutturale del casing.

3.1.4. Frammentazione controllata

Per simulare la frammentazione controllata è stato implementato un modello numerico dedicato costruito con l'ausilio del software Mathcad® [43]. Altri modelli sono proposti in letteratura, come quello indicato in [44]. Tale modello si basa sulla teoria meccanica classica della frattura, sulla legge di perdita di velocità in aria delle schegge (2) e sul modello di penetrazione THOR. Il modello ha l'obiettivo di definire il percorso di infragilimento migliore per le tecniche di frammentazione controllata. Come definito in molti studi presenti in letteratura, l'infragilimento

localizzato si ottiene quasi sempre con percorsi elicoidali che corrono lungo la superficie esterna del casing. Come mostrato in Fig. 34, da questa scelta deriva una scheggia da frammentazione controllata con forma piramidale a base romboidale.

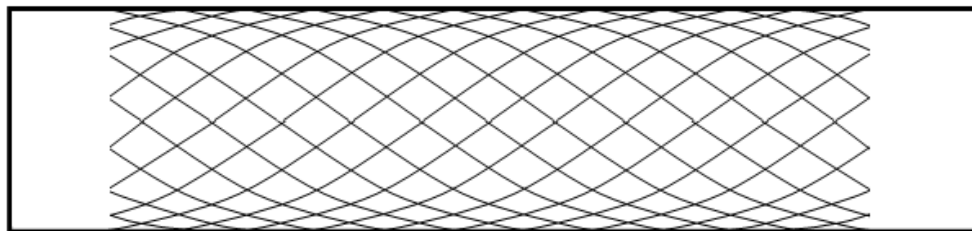


Fig. 35 – Schema di pattern geometrico eseguito per percorso di infragilimento.

Di seguito vengono riportate alcune importanti osservazioni emerse durante la definizione del modello di frammentazione controllata. La Fig. 35, ad esempio, rappresenta il numero di schegge utili a perforare il *target* di riferimento al variare del numero di principi dell'elicoide creato per la frammentazione controllata. In particolare, la figura mostra in blu il numero di schegge derivanti dalla frammentazione controllata e in rosso il numero di schegge a frammentazione non guidata (secondo lo schema di Fig. 17) ma abili comunque a perforare il bersaglio di riferimento.

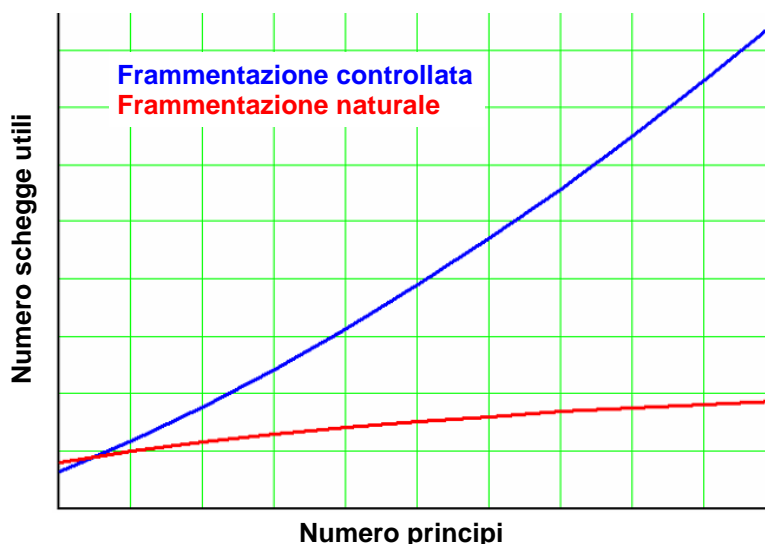


Fig. 36 – Schegge utili per il target di riferimento al variare del numero di principi.

Al crescere del numero di principi, si infittisce il *pattern* geometrico del percorso di infragilimento. Ne consegue una riduzione della dimensione delle schegge a frammentazione controllata e un aumento del loro numero. Queste sono, comunque, tutte abili a perforare il *target* di riferimento.

Aumentando il numero di principi aumenta anche la porzione di casing destinata alla frammentazione non guidata. Però, l'incremento delle schegge di questo tipo è inferiore all'aumento delle schegge a frammentazione controllata. Questo è giustificato dal fatto che l'infittimento del *pattern* geometrico aumenta la massa a frammentazione naturale, ma riduce la dimensione delle schegge formate in questo modo.

3.2 Valutazione preliminare delle tecniche innovative

Sulla base delle considerazioni sui meccanismi di frammentazione e considerando lo stato dell'arte delle tecnologie di controllo della frammentazione è stato proposto di comparare tra loro nove diverse tecniche di infragilimento. Queste tecniche si basano sia su applicazioni specifiche di tecnologie tradizionali note già da decenni in letteratura, sia su tecnologie innovative emerse dall'analisi dello stato dell'arte della frammentazione controllata.

Di seguito l'elenco delle tecniche scelte:

- (A) tempra laser superficiale
- (B) saldatura laser profonda
- (C) intagli interni nel casing ottenuti per asportazione meccanica
- (D) intagli interni nel casing ottenuti per erosione chimica
- (E) micro-foratura laser
- (F) intagli esterni nel casing ottenuti per deformazione plastica
- (G) trattamento chimico di nitrurazione
- (H) trattamento chimico di cementazione
- (I) doppio casing con corpo interno intagliato esternamente

3.2.1 Criteri di valutazione

Le tecniche individuate sono state sottoposte ad una prima valutazione tenendo in considerazione aspetti tecnici ed economici, analisi preliminari di fattibilità, ipotesi di modelli di indagine e strumenti informatici di implementazione, ricerca di vantaggi e svantaggi propri. Sono stati definiti i requisiti principali e, quindi, una tabella di valutazione con relativi pesi.

I pesi dei vari criteri sono stati diversificati per accentuare alcuni aspetti (prestazioni e costo) a discapito di altri. Ad esempio, la compatibilità con il proiettile è stata poco soppesata per evitare di escludere tecniche promettenti solo perché valutate nei confronti di proiettili sotto-calibrati. La valutazione ha portato a selezionare le tecniche da studiare approfonditamente prima di giungere alle prove sperimentali di scoppio statico.

La valutazione delle soluzioni ipotizzate tiene conto di alcuni criteri caratterizzati da un giudizio che va da 1 (giudizio negativo) a 5 (giudizio positivo). I criteri hanno portato ad un valore complessivo di ogni tecnica tenendo conto di opportuni pesi. I criteri scelti sono i seguenti:

-) **prestazioni attese** (è stato valutato quanto la tecnica specifica possa migliorare le prestazioni dello scoppio statico intese come numero di perforazioni sul *target* di riferimento);
-) **fattibilità** (è un giudizio sulla fattibilità e, quindi, sul rischio tecnologico associato alla possibilità di applicare la tecnica alla testa in guerra);

-) **costo** (inteso come costo finale industrializzato dell'applicazione della tecnica di infragilimento alle munizioni guidate e convenzionali);
-) **compatibilità con il proiettile** (è stata valutata l'applicabilità della tecnica in riferimento all'intera struttura di proiettili sotto-calibrati);
-) **innovazione** (è stato comparato il livello di innovazione introdotto dalla soluzione);
-) **effetti aerodinamici** (intendendo una valutazione degli effetti sul *drag* del proiettile e, quindi, sulle sue prestazioni di gittata massima).

3.2.2. Risultati preliminari

La Tab. II riporta i risultati della valutazione preliminare effettuata sulle nove tecniche di infragilimento prescelte. Dalla fase di valutazione preliminare è emerso che le tecnologie per il controllo della frammentazione maggiormente promettenti sono soltanto cinque.

Criteri di valutazione	Prestazioni attese	Fattibilità	Costo	Compatibilità con il proiettile	Innovazione	Effetti aerodinamici	
Peso del criterio	3	2	3	1	2	2	
A Tempra laser superficiale	2	5	5	5	4	5	54
B Saldatura laser profonda	2	4	4	5	4	5	47
C Intagli interni (aspor. mecc.)	3	4	3	1	1	5	39
D Intagli interni (eros. chimica)	2	1	3	1	5	5	38
E Micro-foratura laser	4	3	2	3	5	4	45
F Intagli esterni (def. plastica)	2	2	3	1	5	1	32
G Nitrurazione (tratt. chimico)	2	2	5	3	4	5	46
H Cementazione (tratt. chimico)	2	1	5	3	4	5	44
I Doppio casing (groove interne)	4	3	3	1	4	5	46

Tab. II – Valutazione preliminare delle tecniche innovative di frammentazione.

Si è deciso, dunque, di procedere allo studio e all'approfondimento di queste cinque tecniche:

- (A) tempra laser superficiale
- (B) saldatura laser profonda
- (E) micro-foratura laser
- (G) trattamento chimico di nitrurazione
- (I) doppio casing con corpo interno intagliato esternamente

La tecnica di infragilimento con trattamento chimico di cementazione è stata inizialmente studiata (dato il minimo scarto con le altre ritenute maggiormente promettenti) ma, dopo alcuni test preliminari, si è preferito puntare sul solo trattamento chimico di nitrurazione.

4. LE TECNICHE INNOVATIVE DI CONTROLLO DELLA FRAMMENTAZIONE

Per confrontare le diverse tecnologie in esame, riducendo al minimo le differenze tra loro, sono stati realizzati percorsi di infragilimento con lo stesso angolo di salita delle eliche e con uguale numero di principi. Coerentemente a quanto indicato in letteratura, si è scelto un angolo di salita delle eliche di 60°. Il numero di principi, invece, è stato scelto con l'obiettivo di creare una scheggia a frammentazione controllata di massa tale da rispettare il requisito di penetrazione fissato. In questa scelta, si è cautelativamente ipotizzato la nascita di linee di frattura sia primarie che secondarie durante la frammentazione. Tale ipotesi comporta una riduzione della massa delle schegge a frammentazione guidata di circa un terzo, rispetto all'ipotesi di nascita di solo linee di frattura primarie. Questo dato è emerso dalle esperienze svolte nello sviluppo delle teste in guerra per le munizioni DART e della famiglia Vulcano.

4.1 *Tempra Laser Superficiale*

Lo scopo di tale tecnologia è creare sulla superficie esterna del casing della testa in guerra una serie di discontinuità nelle caratteristiche meccaniche del materiale. Queste discontinuità sono punti di innesco per le linee di frattura originate dall'esplosione. Il pattern superficiale che si vuole realizzare, attraverso linee di trattamento opportunamente incrociate, rispetta la configurazione geometrica decisa.

Dopo prove preliminari con laser Nd:YAG continuo (interrotte per problemi di delicatezza della fibra ottica quando sottoposta a retro-riflessione parziale del fascio), la messa a punto è proseguita con una sorgente CO₂ dotata di sistema di formatura dello spot. In realtà, lo spot laser è stato parzializzato invece che propriamente formato, ma il risultato è simile. Ovviamente, cambia il valore di potenza iniziale per avere un certo livello di irraggiamento sul pezzo: prove di trasmissione hanno consentito di determinare la percentuale di potenza trasmessa (pari al 25% di quella incidente). La Fig. 37 mostra la testa di parzializzazione del fascio laser impiegato per queste esperienze.

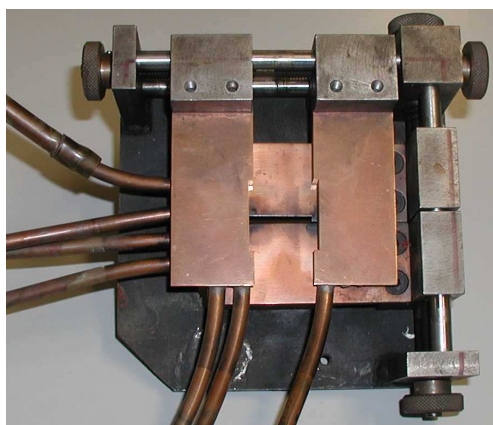


Fig. 37 – Testa per la parzializzazione del fascio laser per tempra superficiale.

Dopo la fase di set-up, sono state eseguite alcune prove preliminari su materiali generici con l'obiettivo di determinare i range di valori di potenza incidente e velocità d'esecuzione compatibili con la profondità di trattamento desiderata. Infine, sono state eseguite una serie di prove sul materiale effettivo con diversi parametri di esecuzione raccolte in Tab. III.

Avanzamento (mm/min)	250	200	150	100	300	250	200	150	100
Potenza irradiata (W)	3000				4000				
Potenza trasmessa (W)	750				1000				
Energia specif. (J/mm²)	82	102	136	205	91	109	136	182	273

Tab. III – Parametri del trattamento di tempra laser superficiale.

Il risultato più interessante, in termini di penetrazione, si ottiene per bassi valori della velocità di avanzamento. Con lo spot selezionato, operando a 1000 W di potenza trasmessa ed a 100 mm/min di velocità di avanzamento, si è registrata una penetrazione totale di circa 2 mm. In questo spessore, per circa 1.5 mm di profondità si ha un abbassamento di durezza intorno al 25%, mentre i rimanenti 0.5 mm si possono considerare una zona di transizione con perdita di durezza del 10%. In Fig. 38 e 39 vengono riportati l'andamento delle durezza riscontrate a varie profondità e una macrografia di una sezione del casing trattato con questi parametri di esecuzione.

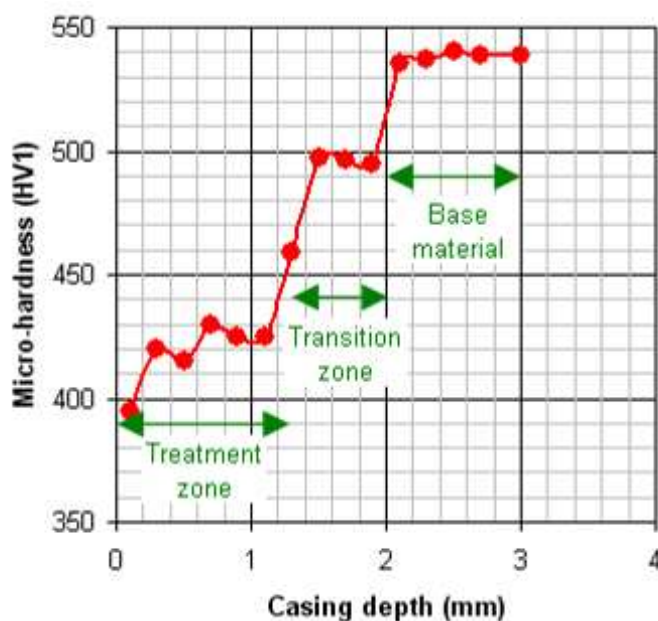


Fig. 38 – Andamento della durezza in funzione delle profondità.

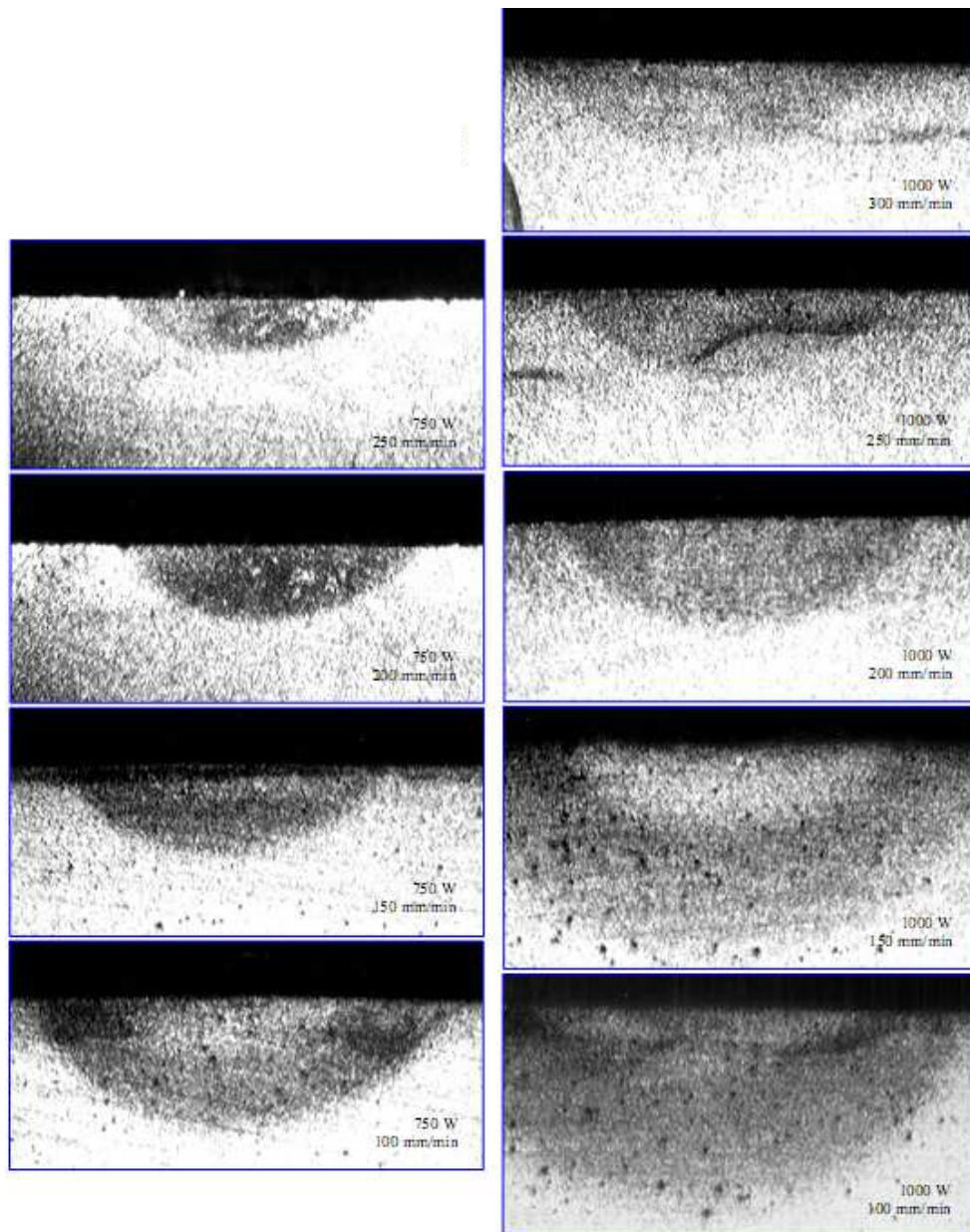


Fig. 39 – Macrografie del trattamento di tempra laser superficiale.

L'obiettivo di penetrare in profondità (nel rispetto dei limiti strutturali imposti) ha richiesto l'impiego contestuale di tempi di interazione lunghi e fasci di dimensioni notevoli. La profondità di trattamento dipende dal tempo di interazione e dalla densità di potenza di irraggiamento: all'aumentare di quest'ultima si possono avere fusioni superficiali non più trascurabili. Su materiali in condizioni base di durezza, tempi di interazione piccoli producono un aumento di durezza, mentre al crescere

del tempo di interazione aumenta la profondità di trattamento ma diminuisce l'effetto tempra. Su materiali già trattati, come nel caso in esame, il trattamento laser è una vera ricottura, poiché causa una perdita di durezza rilevante. Ne deriva un meccanismo di rottura che non passa attraverso un infragilimento, ma piuttosto attraverso un indebolimento della struttura martensitica, creata nel materiale dal trattamento termico originale.

Nel caso specifico di questa tesi, in cui si fa riferimento a teste in guerra in acciaio maraging, si è intravista una maggiore efficacia del trattamento di saldatura laser profonda a discapito della tempra laser superficiale. Per questo motivo lo studio della tecnologia di tempra laser superficiale si è interrotta a questo punto di verifica dell'applicabilità. Non si è proceduto alla messa a punto di un modello software dedicato alla previsione della frammentazione controllata, né alla realizzazione di teste in guerra con questa tecnica da sottoporre a test di scoppio statici.

4.2 Saldatura Laser Profonda

In considerazione dell'obiettivo prefissato (indebolimento strutturale dalla superficie ad una certa profondità) la saldatura laser profonda risulta una tecnologia più adatta per i materiali impiegati (acciaio maraging). Data la riduzione di durezza ottenuta nelle zone superficiali fuse, si è pensato di utilizzare linee di fusione profonda (ovvero, saldature ottenute con bassa velocità di avanzamento) per produrre lo stesso effetto di indebolimento. Il nuovo set-up di lavorazione (con cui si sono eseguite le prove riassunte nella tabella seguente) è contraddistinto da uno spot più concentrato e da diversi valori di potenza trasmessa e velocità di avanzamento.

Potenza (W)	Avanzamento (mm/min)	Penetrazione (mm)	Durezza @ 0.8mm (HV1)	Durezza @ 1.3mm (HV1)	Durezza @ 1.8mm (HV1)
2000	2000	2.5	345	344	344
2000	1000	3.5	344	368	370
1000	500	2.7	312	323	330

Tab. IV – Parametri del trattamento di saldatura laser profonda.

È risultata una zona fusa più profonda della zona temprata (mediamente di quasi il 50%) e caratterizzata da una maggiore diminuzione di durezza (nell'ordine del 35÷40%). Come mostrato nella macrografia in Fig. 40 la saldatura profonda, a differenza della tempra superficiale, demarca un repentino aumento del rapporto tra profondità e larghezza della zona di materiale alterato.

Si è deciso, quindi, di comparare queste due tecniche operative sottoponendo provini distinti a prove distruttive di trazione e resilienza. In particolare, sono stati preparati provini in cinque configurazioni differenti: la prima (di confronto) riguarda provini con materiale allo stato base; la seconda e terza configurazione raccoglie provini con tempra laser superficiale che hanno mostrato maggiori profondità di trattamento; le ultime due configurazioni sono costituite da provini con saldatura laser profonda. I risultati dei test di trazione e resilienza sono riportati in tabella a seguire. La Fig. 41 mostra invece alcuni provini preparati per i test di trazione e resilienza

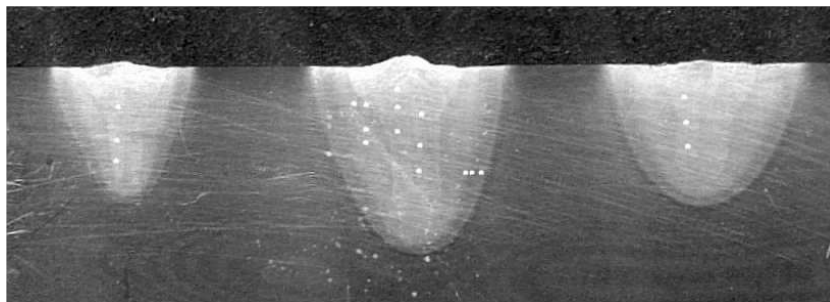


Fig. 40 – Test di saldatura laser profonda.

Provino	UTS (MPa)	Differ.	Allung.	Differ.	Trattam.	Provino	Energia impatto	Differ.
T11	1978	---	10 %	---	Base material	R11	31 J	---
T12	1988		10 %			R12	33 J	
T13	1099	- 45 %	11.2 %	+ 9 %	4000 W 0.1 m/min	R13	89 J	+ 188 %
T14	1096		10.7 %			R14	94 J	
T15	1640	- 16 %	4.9 %	- 51 %	3000 W 0.15 m/min	R15	72 J	+ 137 %
T16	1692		5 %			R16	74 J	
T17	1130	- 43 %	4.6 %	- 57 %	2000 W 1 m/min	R17	33 J	+ 15 %
T18	112		4.1 %			R18	40 J	
T19	1469	- 26 %	2 %	- 78 %	2000 W 2 m/min	R19	24 J	- 29 %
T20	1477		2.4 %			R20	21 J	

Tab. V – Risultati delle prove di trazione e resilienza con tempra laser superficiale.



Fig. 41 – Provini per test di trazione e resilienza con saldatura laser profonda.

Saldatura profonda e tempra superficiale danno risultati positivi solo se eseguiti a velocità relativamente elevate. Tuttavia, il trattamento di tempra superficiale risulta meno efficiente: la zona ricotta superficialmente è piuttosto grande e ciò porta a significativi aumenti dell'energia assorbita all'impatto. Tale trattamento è accompagnato da una buona riduzione della resistenza a trazione (almeno alle velocità più basse che originano una maggior quantità di fuso), ma questo non crea comunque un infragilimento sufficiente. I risultati ottenuti con la saldatura sono sicuramente migliori: infatti, la penetrazione del trattamento risulta maggiore e più concentrata. Inoltre, alle velocità elevate, si ha sia una riduzione dell'energia assorbita all'impatto (di quasi un terzo) sia un abbassamento della resistenza a trazione (pari ad oltre un quarto).

Alla luce di questi risultati, si è scelto di simulare prima via software e sottoporre a test sperimentali poi due teste in guerra con infragilimento ottenuto per mezzo di saldatura laser profonda. Le simulazioni preliminari in Fig. 40 mostrano un aumento del 35% delle perforazioni del target di riferimento rispetto alla simulazione effettuata per la testa in guerra a frammentazione naturale.

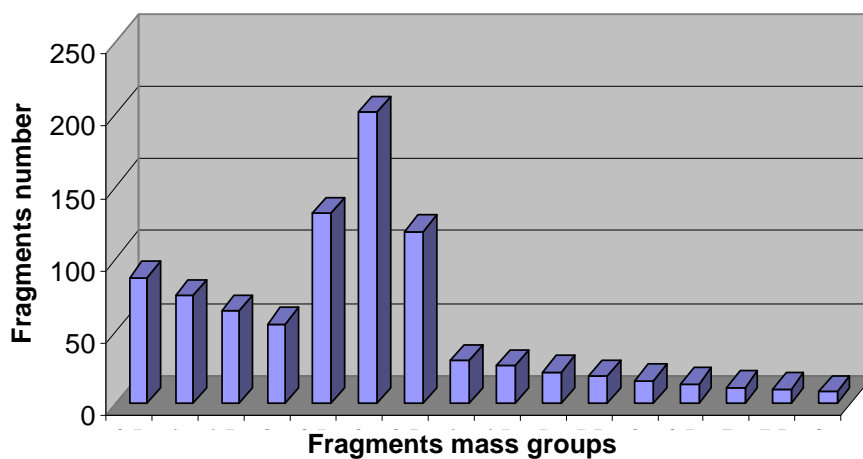


Fig. 42 – Simulazione della distribuzione di massa per saldatura laser profonda.

4.3 Micro-foratura laser

Il lavoro di definizione della tecnologia di micro-foratura laser fa seguito ad una prima attività di ricerca eseguita da OTO Melara negli anni addietro. Tale attività si proponeva di eseguire fori ciechi su cilindri metallici per creare linee preferenziali di rottura: è stata dimostrata la fattibilità tecnica e la lavorazione ha avuto buon esito in termini di distribuzione di massa. Per il presente studio si ha, invece, l'obiettivo di creare un pattern di micro-fori sulla superficie esterna del casing prescelto che rispetti la geometria di frammentazione controllata che è stata scelta. La Fig. 43 mostra una foto dell'impianto laser utilizzato durante la fase di setup di questa tecnica.

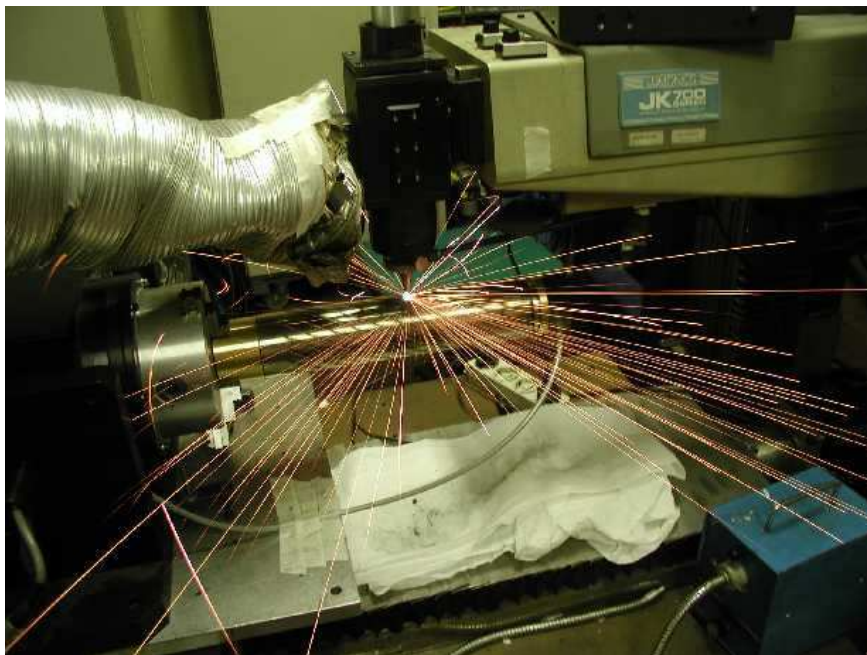


Fig. 43 – Macchina di micro-foratura laser.

Per l'attività si è utilizzato un laser impulsato Nd:YAG, dotato di testa di foratura. Durante la fase di messa a punto si è cercato il diametro minimo del foro, compatibile con la profondità richiesta dal rispetto dei limiti strutturali, che minimizzi il tempo di lavorazione. In considerazione delle dimensioni ridotte del foro si è optato per l'uso di azoto come gas di assistenza alla lavorazione. I risultati preliminari vengono riportati di seguito.

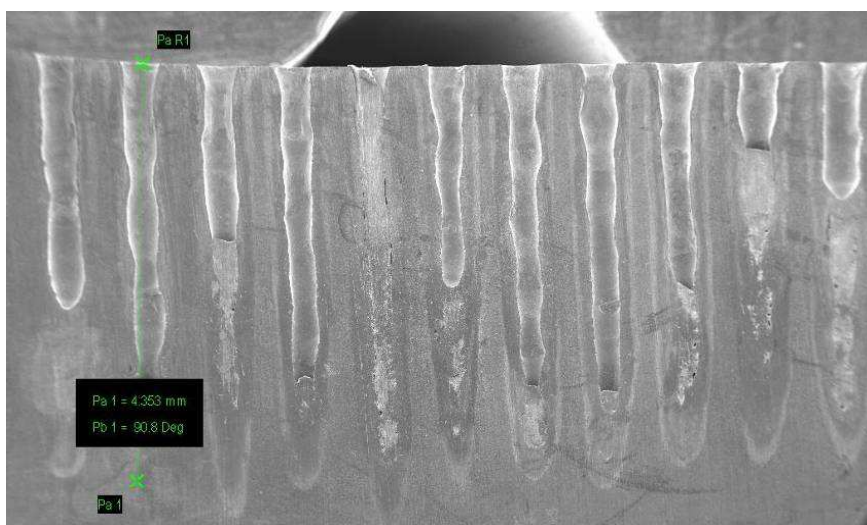


Fig. 44 – Test di micro-foratura laser.

In particolare, sono state testate tre configurazioni diverse al variare dei parametri caratteristici del processo come durata ed energia dell'impulso, potenza del laser e focalizzazione. In tutte le configurazioni la sezione longitudinale dei fori appare piuttosto omogenea (considerando che trattasi di foro cieco): questo è indice di buona riuscita del processo. Fissato il diametro del foro, si è scelto un passo tra i fori abbastanza grande da ridurre i tempi di lavorazione nei limiti di garanzia di guida della frammentazione. La tecnologia di micro-foratura laser, così definita in tutti i suoi parametri di processo, è stata quindi valutata in termini prestazionali attraverso l'esecuzione di prove di trazione e resilienza. I risultati di questi test distruttivi, eseguiti su quattro distinti provini, sono riportati di seguito.

Provino	UTS (MPa)	Differ.	Allung.	Differ.	Trattam.	Provino	Energia impatto	Differ.
T11	1978	---	10 %	---	Base material	R11	31 J	---
T12	1988		10 %			R12	33 J	
T21	1368	- 32 %	0.5 %	- 96 %	Laser μ -drilling	R13	11 J	- 65 %
T22	1318		0.4 %			R14	11 J	

Tab. VI – Risultati delle prove di trazione e resilienza con micro-foratura laser.

Comparando i risultati con quelli eseguiti su materiale allo stato base, si nota che questa tecnologia riduce di quasi un terzo la resistenza a rottura (con allungamento quasi nullo) e di quasi due terzi l'energia assorbita all'impatto. A questo livello di comparazione, la tecnologia di micro-foratura laser risulta più promettente dell'infragilimento per mezzo di saldatura laser profonda.

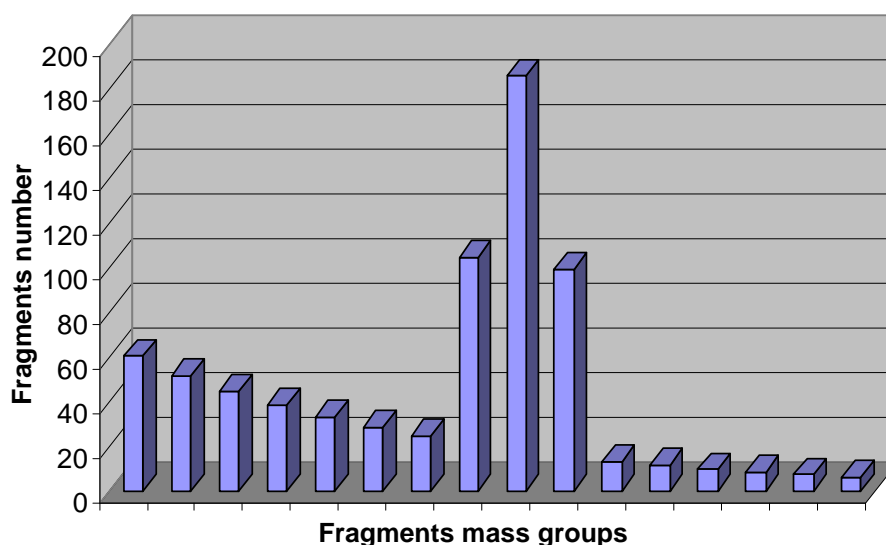


Fig. 45 – Simulazione della distribuzione di massa per micro-foratura laser.

La frammentazione della testa in guerra appena definita è stata, quindi, simulata via software al fine di avere un primo valore delle prestazioni attese. La maggiore profondità di penetrazione di questa tecnologia sposta la distribuzione delle schegge verso classi di massa maggiore. Di conseguenza il numero di perforazioni del target di riferimento che viene simulato, aumenta del 42% rispetto alla simulazione con frammentazione naturale e di quasi il 5% nei confronti della tecnologia di saldatura laser profonda.

A questo punto si è proceduto a costruire le due teste in guerra da sottoporre a test di scoppio statico sperimentale. Per la micro-foratura laser dei casing si è implementato un flusso di raffreddamento in grado di limitare l'innalzamento globale di temperatura del pezzo. Il materiale del casing è, infatti, sensibile agli innalzamenti di temperatura che provocherebbero la perdita del trattamento di invecchiamento originale. Il flusso di raffreddamento mantiene il pezzo freddo (a temperatura ambiente) durante il processo. Nella Fig. 40 vengono riportati due dettagli della lavorazione di micro-foratura rispettivamente prima e dopo la fase di lucidatura.

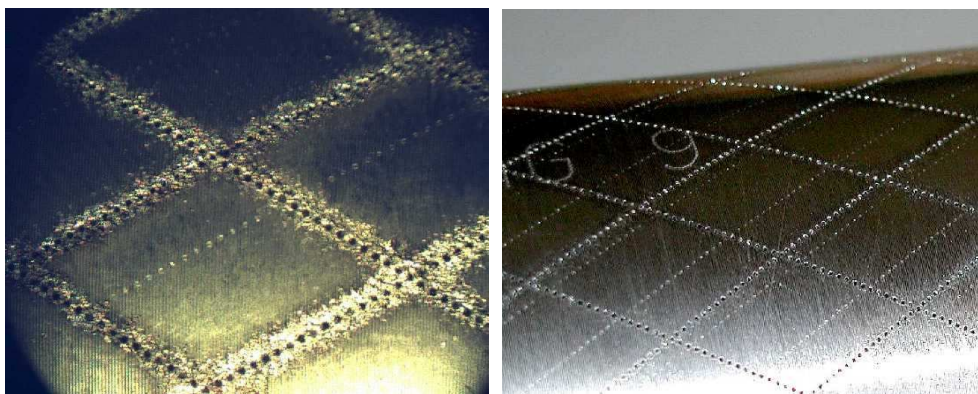


Fig. 46 – Dettagli di lavorazione di micro-foratura prima (sx) e dopo (dx) lucidatura.

4.4 Trattamento chimico di nitrurazione

La nitrurazione è un trattamento termo-chimico di diffusione che si effettua per assorbimento di azoto allo scopo di impartire ai pezzi una durezza superficiale molto alta. L'uso di questa tecnologia ha l'obiettivo di infragilire localmente il casing delle teste in guerra, lungo il solito pattern geometrico, attraverso un forte aumento di durezza superficiale (fino al 75%).

La messa a punto di questa tecnologia si è basata sull'impiego di due tipologie di nitrurazione normalmente utilizzate per gli acciai di tipo maraging. Con la prima tipologia di nitrurazione, eseguita a 490 °C, si ottiene in un unico trattamento sia l'invecchiamento sia la nitrurazione della superficie. Il ciclo è eseguito sotto vuoto con scarica ionica di azoto-idrogeno che consente in breve tempo di ottenere uno strato di indurimento superficiale superiore al decimo di millimetro. Con la seconda tipologia di nitrurazione è stato fatto, dapprima, un invecchiamento classico del materiale di partenza e, successivamente, una nitrurazione a bassa temperatura (440 °C), sempre in scarica ionica con atmosfera di azoto-idrogeno. La nitrurazione

è stata fatta a temperatura bassa per evitare ulteriori fenomeni di invecchiamento che possono ridurre la resistenza meccanica del materiale.

Al fine di valutare queste due tipologie di nitrurazione sono stati effettuati test distruttivi di trazione e resilienza. Nello specifico, sono stati prodotti coppie di provini per ogni test in tre distinte configurazioni: le due in prova ed una di confronto in materiale base senza alcun trattamento. I risultati ottenuti sono riportati di seguito.

Provino	UTS (MPa)	Differ.	Allung.	Differ.	Trattam.	Provino	Energia impatto	Differ.
T01	1981	---	10.1 %	---	Base material	R01	28 J	---
T02	2017		9.9 %			R02	29 J	
T03	2023	+ 0.4 %	8 %	- 10 %	Nitriding @ 490 °C	R03	19 J	- 32 %
T04	1992		10 %			R04	20 J	
T05	2033	+ 1.8 %	8.3 %	- 15 %	Nitriding @ 440 °C	R05	20 J	- 28 %
T06	2037		8.8 %			R06	21 J	

Tab. VII – Risultati delle prove di trazione e resilienza con nitrurazione chimica.

La nitrurazione a più alta temperatura non ha alterato la resistenza meccanica dei provini, ma ha prodotto una riduzione dell'energia assorbita all'impatto di circa un terzo. La nitrurazione a più bassa temperatura, invece, ha mostrato all'incirca la stessa riduzione di resilienza ed un calo dell'allungamento percentuale a rottura non trascurabile (pari a quasi un sesto). Le due tipologie di nitrurazione danno in sintesi risultati pressoché analoghi: tuttavia, si sceglie di proseguire con quella a temperatura inferiore poiché caratterizzata da un ciclo di lavoro globalmente più snello. Si procede, dunque, alla produzione di due teste in guerra con infragiliemnto chimico di nitrurazione da destinare a prove di scoppi statici.



Fig. 47 – Casing con trattamento di nitrurazione.

Nella Fig. 47 viene rappresentato un particolare della produzione effettuata. Si nota la vernice anti-nitrurante a base di rame impiegata per proteggere il materiale base dal trattamento. Le misure superficiali di durezza effettuate dopo il trattamento hanno dato valori intorno ai 1000 HV1 nelle zone nitrurate a fronte di circa 570 HV1 misurati nelle zone protette. Purtroppo, non è stato possibile ricavare provini sezionati dai pezzi trattati, e quindi non sono disponibili misure di profondità di penetrazione del trattamento. Questo dato non ha consentito di svolgere simulazioni preliminari mirate alla misura delle prestazioni della testa in guerra.

4.5 Doppio casing con corpo interno Intagliato esternamente

La testa in guerra con tecnica di infragilimento a doppio casing prevede la scomposizione del casing cilindrico in due parti anulari concentriche, con intagli sull'esterno del casing minore. Questa soluzione è di più facile realizzazione e non crea effetti negativi sul *drag*; inoltre, la discontinuità all'interfaccia tra i due casing crea un effetto di controllo indiretto della frammentazione del casing esterno [45]. Gli intagli seguono il solito *pattern* geometrico impostato per le altre tecnologie, hanno profondità di 1 mm e presentano un profilo asimmetrico. Quest'ultima scelta non punta a privilegiare la formazione di sole linee di frattura primarie, ma vuole consentire che lo spigolo vivo, creato sul casing interno, impatti sul cilindro maggiore. Il montaggio dei due casing è con gioco radiale medio di 0.05 mm, per non complicare l'assemblaggio. La Fig. 48 mostra le due parti (interna ed esterna) di questa soluzione prima dell'assemblaggio. La complessità di questa soluzione e la profonda differenza con le altre tecniche impone una specifica analisi sulla scheggiatura attesa ed una verifica strutturale ulteriore.



Fig. 48 – Soluzione a doppio casing con intagli sull'esterno del corpo minore.

La simulazione della fase di scoppio eseguita con Autodyn ha indicato velocità iniziali delle schegge analoghe a quelle simulate con frammentazione naturale. Il risultato è riportato nella Fig. 49 a seguire.

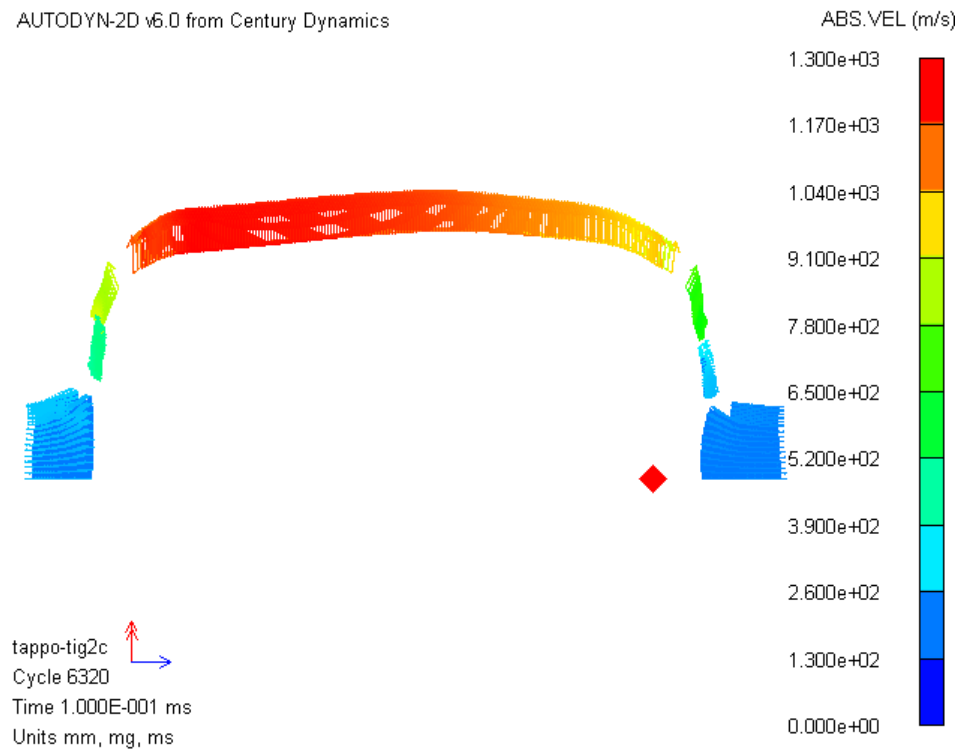


Fig. 49 – Velocità iniziale delle schegge simulata per la soluzione a doppio casing.

Nella valutazione del numero di schegge si assume che il casing esterno segua le leggi della frammentazione naturale. Tuttavia, essendo gli spessori ridotti e considerando che la zona a frammentazione non controllata è molto sottile, si suppone che la stessa non produca schegge utili a perforare il target di riferimento. Ne consegue che la massa a frammentazione non controllata non è trascurabile, anzi come mostrato in Fig. 50, essa è circa il 54% della massa totale del casing. Mentre, le simulazioni svolte per la tecnologia di tempra laser superficiale stimano (a parità di pattern geometrico scelto) una massa destinata alla frammentazione naturale di oltre il 70% della massa totale del casing.

Raffrontando le varie tecniche in esame per il controllo della frammentazione, viene riportato in Fig. 51 la simulazione del numero delle schegge a frammentazione controllata in funzione dei principi dell'elicoide. Con la tecnica a doppio casing, a parità di numero di intagli, si ottiene un raddoppio del numero delle schegge rispetto alle altre teste in guerra.

La Fig. 52, invece, mostra una simulazione con frammentazione controllata in termini di massa delle schegge in funzione del numero di principi, per due diverse tecnologie (saldatura laser e doppio casing). I risultati sono stati divisi nell'ipotesi di frammentazione teorica, con sole linee di frattura primaria, e frammentazione effettiva (con anche linee di frattura secondarie). Si può notare che la differenza tra masse teoriche ed effettive si riduce nella tecnologia a doppio casing: infatti, per i minori spessori dei casing, le linee di frattura raggiungono la superficie opposta senza formare una scheggia piramidale.

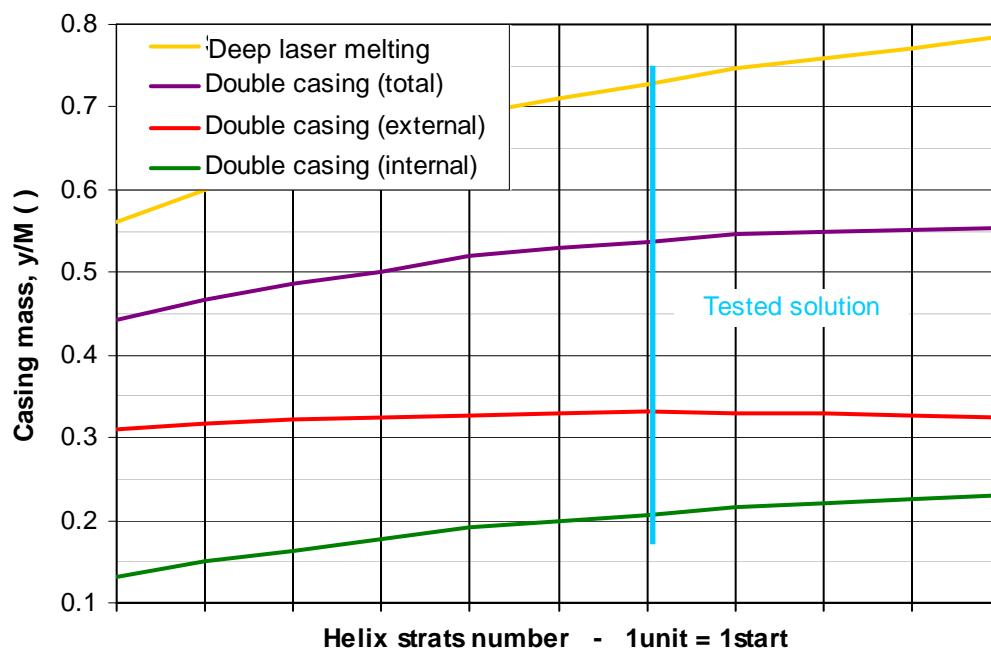


Fig. 50 – Massa a frammentazione non controllata al variare del numero di principi.

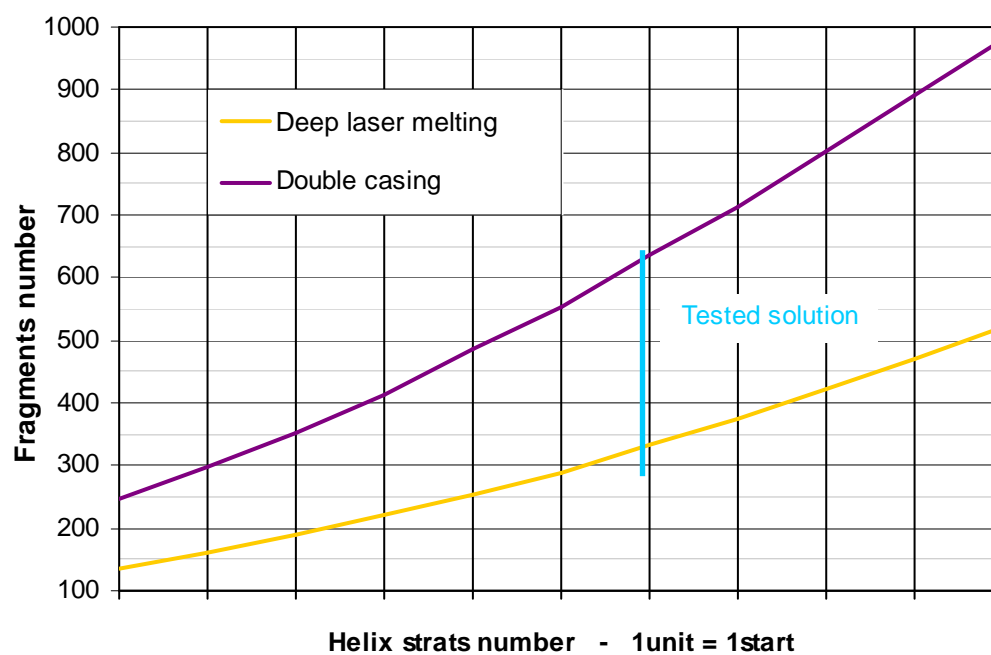


Fig. 51 – Numero schegge controllate al variare del numero di principi dell'elicoide.

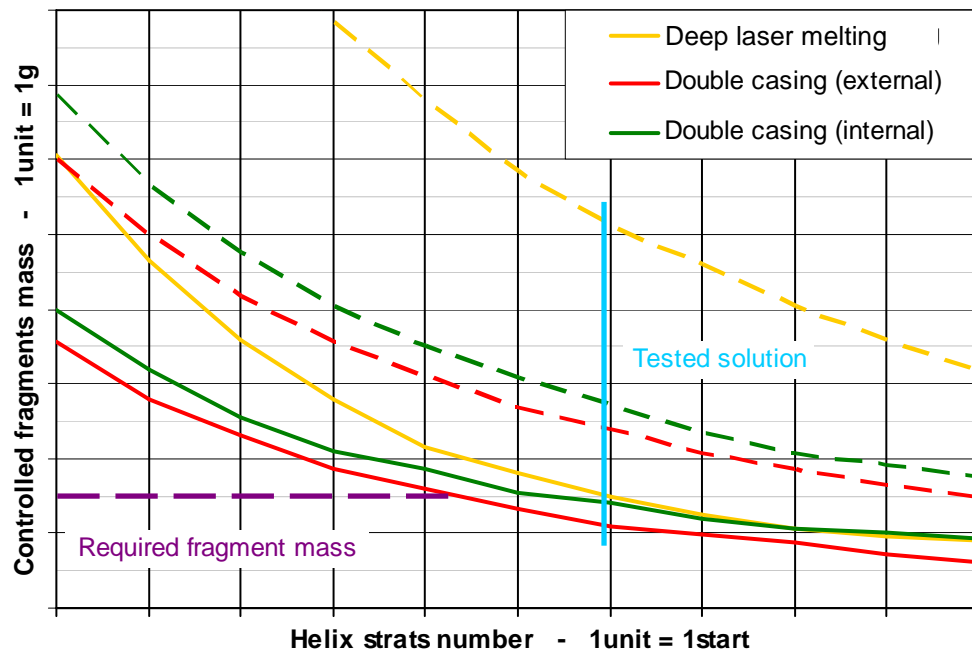


Fig. 52 – Massa schegge controllate al variare del numero di principi dell'elicoide.

L'analisi strutturale eseguita su questa testa in guerra, per simulare le condizioni allo sparo, è basata su un modello tri-dimensionale con elementi gap interposti tra i due casing. Gli altri parametri sono i medesimi utilizzati per la simulazione della testa in guerra a frammentazione naturale. In Fig. 53 vengono riportati i risultati ottenuti con il modello costruito in ambiente Ansys, in termini di tensione equivalente di *Von Mises*. Coerentemente con le attese, il livello di sollecitazioni simulato è compatibile con le caratteristiche del materiale.

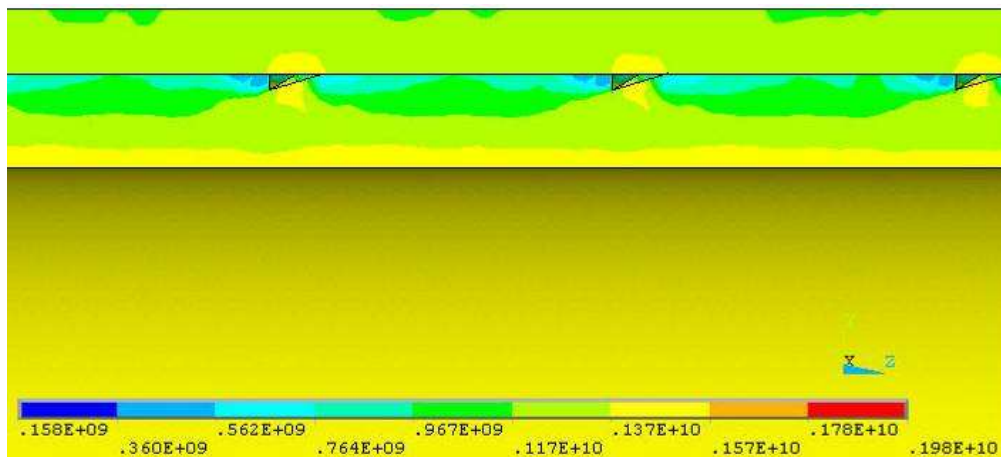


Fig. 53 – Analisi strutturale soluzione doppio casing.

Infine, la frammentazione della testa in guerra con doppio casing viene simulata in termini di distribuzione della massa delle schegge con i risultati riportati in Fig. 54. Gli stessi risultati sono riportati in Fig. 55 insieme a quelli ottenuti per le altre tecniche di frammentazione. Si nota che la soluzione a doppio casing è quella con minore dispersione, mantenendo lo stesso valor medio della tecnica di saldatura laser. Il modello Mathcad di frammentazione ha poi evidenziato un elevato numero di schegge in grado di perforare il bersaglio di riferimento. In particolare, si registra un aumento dell'11% rispetto alle simulazioni con micro-foratura laser, del 16% rispetto a quelle con saldatura profonda e del 58% rispetto alla frammentazione naturale. Anche per questa tecnica di controllo della frammentazione sono state costruite due teste in guerra da sottoporre a test sperimentale di scoppio statico.

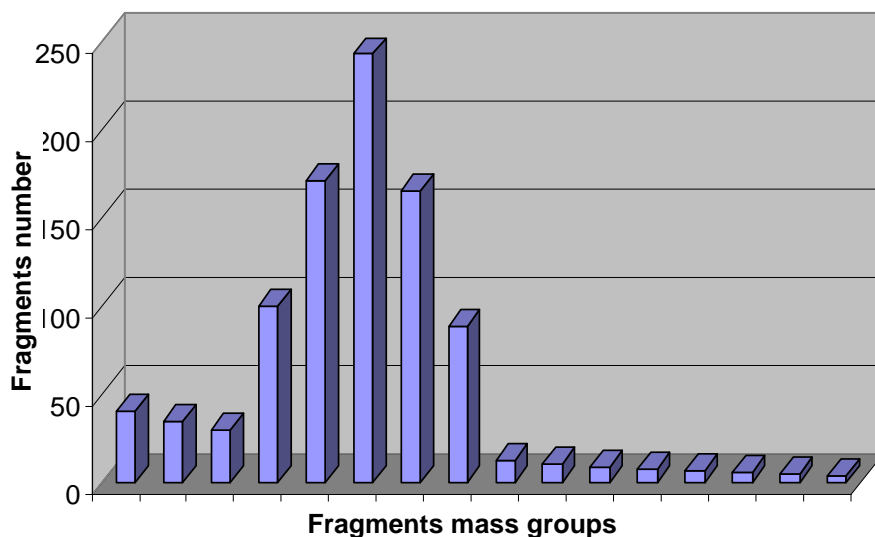
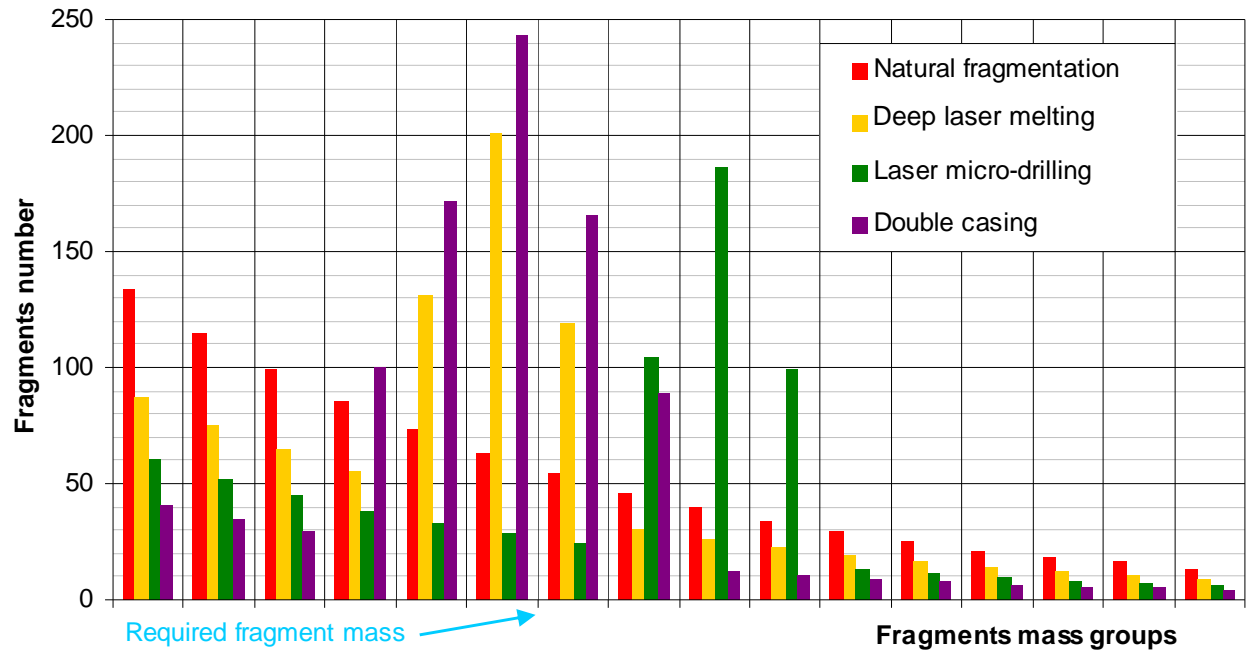


Fig. 54 – Simulazione della distribuzione di massa per doppio casing.

Fig. 55 – Simulazioni delle distribuzioni di massa delle varie tecniche in esame.



5. FASE SPERIMENTALE

5.1 Layout di prova

Per valutare e comparare tra loro le diverse tecnologie di controllo della frammentazione prese in esame, sono stati svolti una serie di test sperimentali di scoppi statici, ovvero il test arena. Le prove sono state organizzate in modo da risultare fortemente rappresentative del fenomeno, ripetibili, affidabili, altamente significative e pregne di informazioni. Duplicando ogni configurazione in prova, si aumenta l'affidabilità e la significatività dei risultati. Le configurazioni di testa in guerra in prova sono complessivamente cinque: oltre alle TIG preparate con quattro diverse tecnologie di controllo della frammentazione, sono state preparate due TIG a frammentazione naturale da usare come raffronto. Le prove hanno l'obiettivo di misurare la velocità, la capacità di penetrazione e la distribuzione di massa delle schegge prodotte dall'esplosione: il layout dell'area di prova è riportato di seguito.

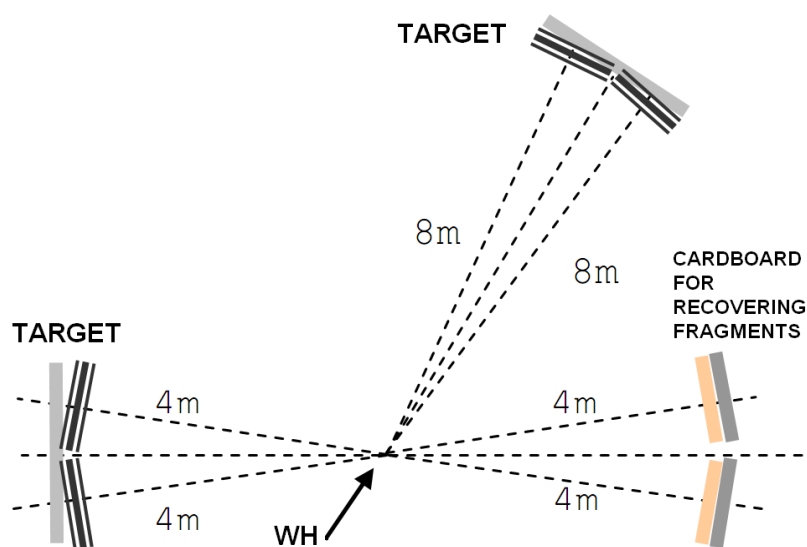


Fig. 56 – Layout di prova del test arena.

Per la misura della velocità dei frammenti sono stati impiegati break screen posti a distanza nota. La grandezza misurata è il tempo trascorso tra detonazione e rottura dei break screen a causa delle schegge: la velocità è il rapporto tra distanza nota e tempo misurato. La misura del tempo è fatta monitorando ad un elevato campionamento (1 MHz) la corrente che passa attraverso i break screen e un apposito pin a ionizzazione posto sulla testa in guerra che viene istantaneamente cortocircuitato dalla detonazione.

Per la misura della capacità di penetrazione sono stati impiegati quattro target di dimensioni frontali 1 m X 2 m posizionati a due distanze diverse pari l'una al doppio dell'altra. I target sono disposti con il lato maggiore parallelo all'asse della testa in guerra, ovvero al vettore gravitazionale: essi coprono circa la tredicesima parte

dell'angolo giro alla distanza minore. La valutazione della distribuzione angolare delle schegge sul piano longitudinale della testa in guerra esula dagli obiettivi di questo studio: pertanto la configurazione di prova sperimentale non tiene in considerazione questa misura.

Per la raccolta delle schegge finalizzata allo studio della distribuzione di massa ed all'analisi delle linee di frattura sono stati utilizzati due bersagli in cartone dalle dimensioni frontali 1 m X 1.4 m e dallo spessore di 240 mm. La bassa densità del cartone (0.6 Kg/dm^3 , minore di quella dell'acqua) consente una raccolta delle schegge migliore rispetto a quella effettuata in pozzo.



Fig. 57 – Foto del test arena. Si notano TIG, cartoni, lamiere e break-screen.

5.2 Analisi dei dati

Il numero ridotto di misure della velocità di proiezione delle schegge fatte per ogni scoppio non consentono articolate analisi statistiche. Tuttavia, relativamente alla testa in guerra a frammentazione naturale, le velocità registrate sono in linea con le simulazioni fatte in precedenza. Inoltre, i risultati ottenuti per le altre configurazioni non demarcano rilevanti differenze con gli scoppi eseguiti con le teste in guerra a frammentazione naturale. La Tab. IX riporta alcuni dati di velocità misurati in quattro distinti test arena.

Le figure a seguire riportano il numero di perforazioni medie registrate per ogni configurazione al variare dello spessore del bersaglio. I grafici sono relativi alle due distanze alle quali sono stati posizionati i bersagli. È stata indicata con linea tratteggiata il bersaglio di riferimento ed il suo equivalente alla distanza maggiore.

		distanza	tempi	velocità media
		[mm]	[ms]	
CART1	TARGET1	4000	3.29	1216
CART2	TARGET1	4000	3.29	1216
CART3	TARGET1	4000	3.68	1086
CART4	TARGET2	8000	7.50	1066
CART5	TARGET2	8000	7.40	1080
CART6	TARGET2	8000	7.07	1131
CART7	TARGET3	13720	20.65	665
		distanza	tempi	velocità media
		[mm]	[ms]	
CART1	TARGET1	4000	3.41	1174
CART2	TARGET1	4000	3.25	1231
CART3	TARGET1	4000	3.84	1043
CART4	TARGET2	8000	7.07	1132
CART5	TARGET2	8000	6.89	1161
CART6	TARGET2	8000	7.02	1140
		distanza	tempi	velocità media
		[mm]	[ms]	
CART1	TARGET1	4000	2.94	1362
CART2	TARGET1	4000	3.43	1166
CART3	TARGET1	4000	3.76	1065
CART4	TARGET2	8000	7.69	1040
CART5	TARGET2	8000	7.26	1102
CART6	TARGET2	8000	7.37	1086
CART7	TARGET3	13720	14.80	927
		distanza	tempi	velocità media
		[mm]	[ms]	
CART1	TARGET1	4000	3.48	1149
CART2	TARGET1	4000	3.01	1327
CART3	TARGET1	4000	3.70	1082
CART4	TARGET2	8000	7.60	1053
CART5	TARGET2	8000	7.52	1064
CART6	TARGET2	8000	7.76	1032
CART7	TARGET4	13700	17.67	775

Tab. VIII – Dati di velocità misurati in quattro distinti test arena.

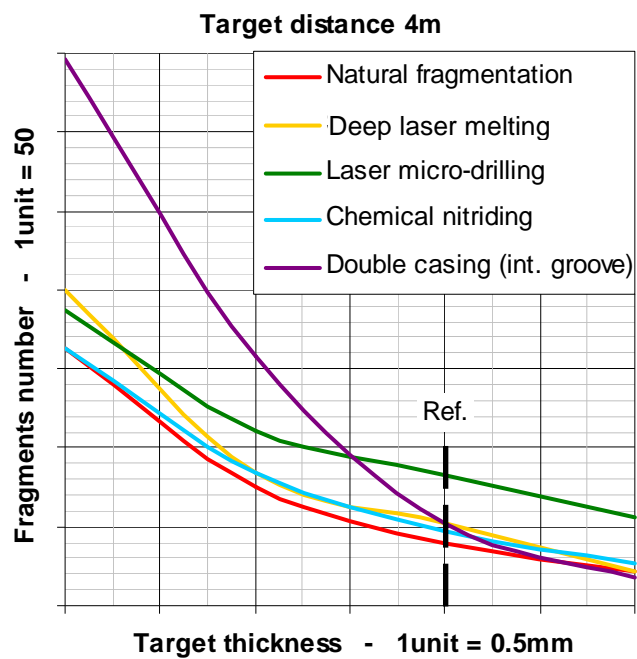


Fig. 58 – Risultati sperimentali in numero di perforazioni sul target a 4 m.

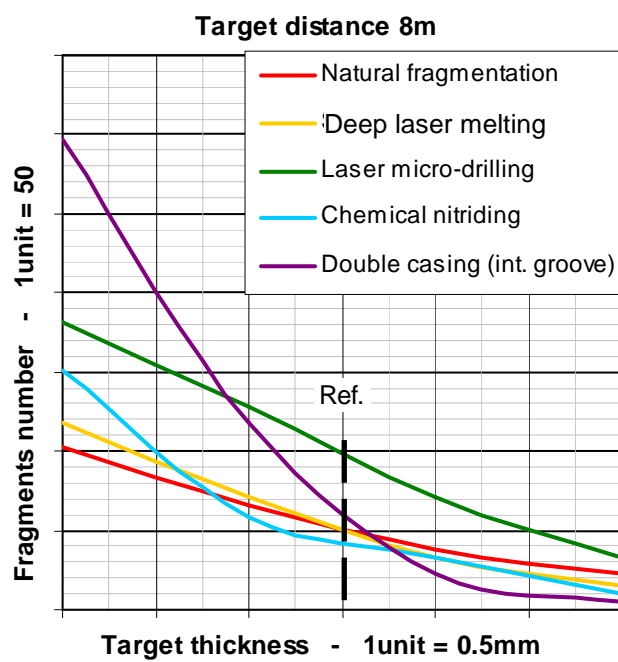


Fig. 59 – Risultati sperimentali in numero di perforazioni sul target a 8 m.

Relativamente al target posto a distanza minore, si nota che tutte le tecnologie di guida della frammentazione prese in esame sono più efficienti della frammentazione naturale per ogni spessore studiato. Invece, a distanza maggiore, questa affermazione vale soltanto per gli spessori più piccoli tra quelli considerati. Questa osservazione è strettamente legata alla distribuzione di massa delle varie configurazioni in prova.

Dai grafici di sopra si può notare, inoltre, che la tecnologia del doppio casing con corpo interno intagliato ha una maggiore capacità di perforazione sugli spessori minori del target. Invece, la tecnologia di micro-foratura laser ha maggiore capacità sugli spessori più grandi. In particolare, quest'ultima risulta sempre superiore alle altre tecnologie (fatta eccezione per quella a doppio casing). Tuttavia, considerando lo spessore del target di riferimento, si nota che la micro-foratura ha sempre una maggiore capacità di perforazione (da 1.5 volte fino a 2 volte quella delle altre tecnologie, vedi Fig. 60).

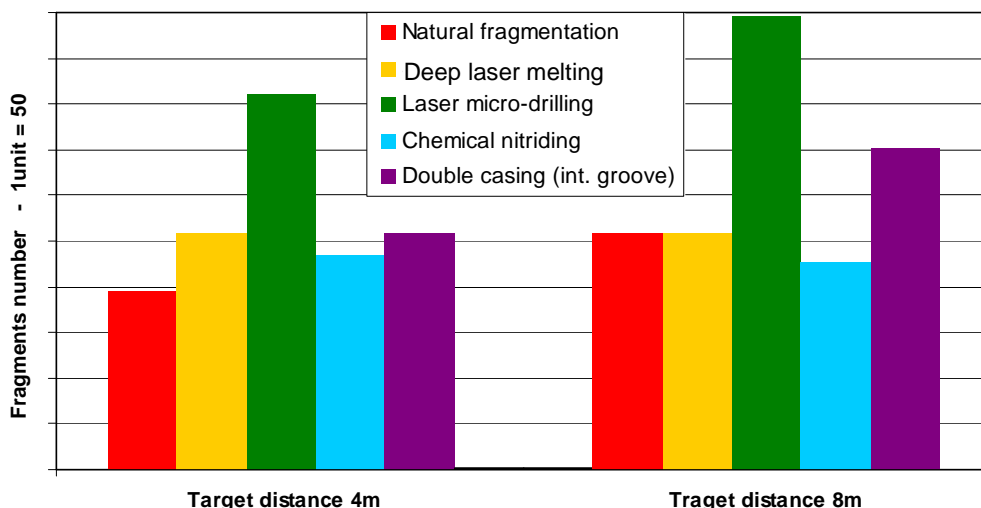


Fig. 60 – Numero di perforazioni sul target di riferimento.

Di seguito vengono riportati i grafici che ricostruiscono la distribuzione di massa delle schegge prodotte dai vari test. Nello specifico, viene riportata l'andamento cumulativo del numero di schegge (Fig. 61) e della massa della testa in guerra (Fig. 62) al variare della classe di massa delle schegge. Inoltre, vengono riportati gli istogrammi di frequenza registrati per ogni classe in termini di numero di schegge (fig. 63) e relativa percentuale in massa (fig. 64).

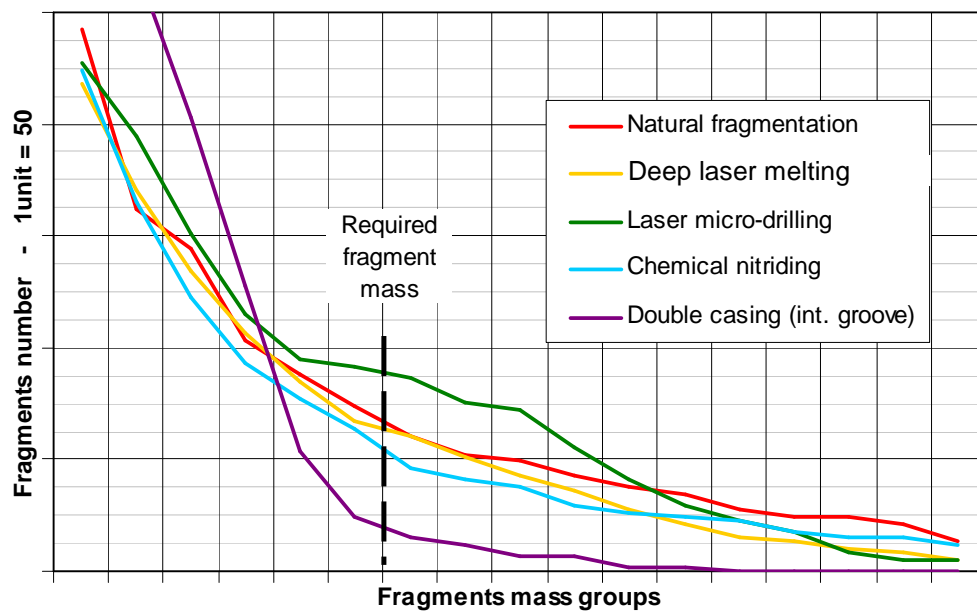


Fig. 61 – Cumulata del numero di schegge per le diverse configurazioni testate.

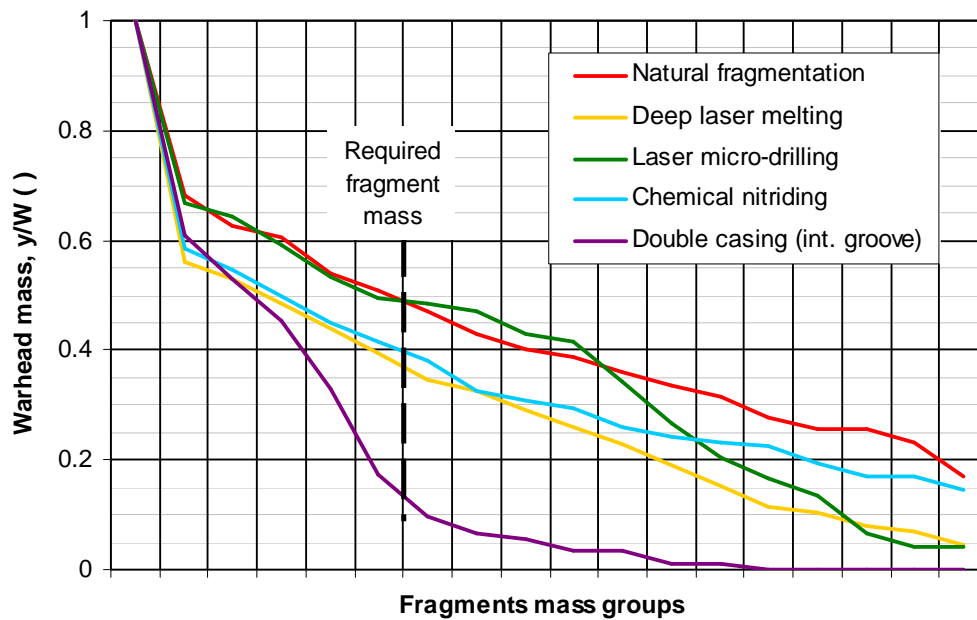


Fig. 62 – Cumulata della massa TIG per le diverse configurazioni testate.

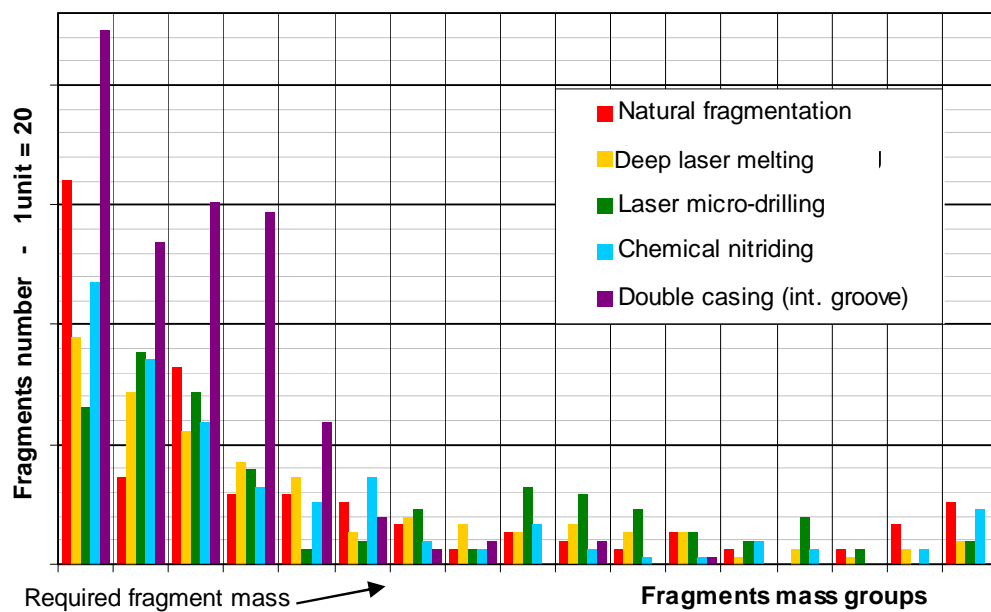


Fig. 63 – Frequenze delle classi di massa per le diverse configurazioni testate.

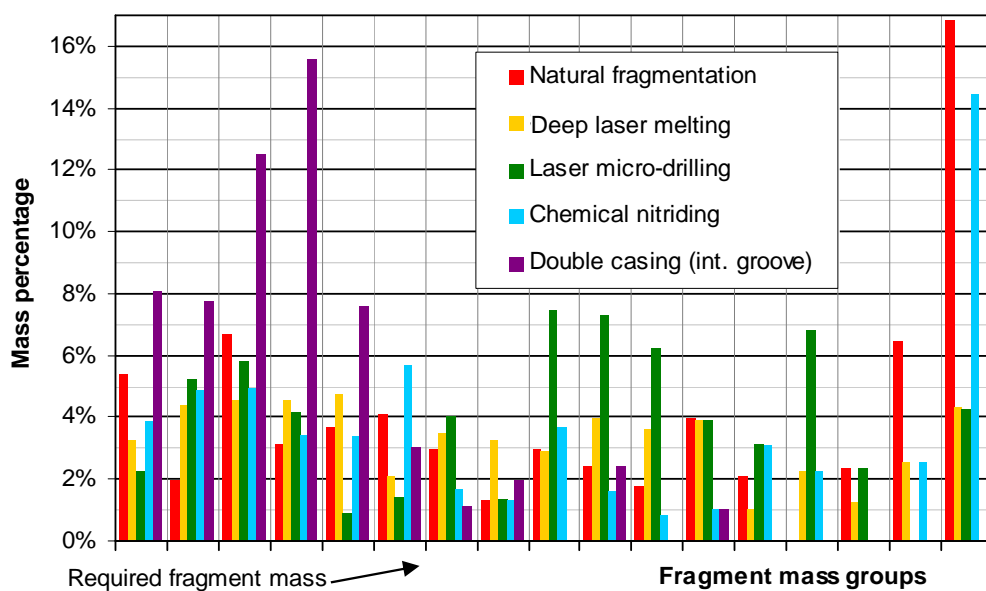


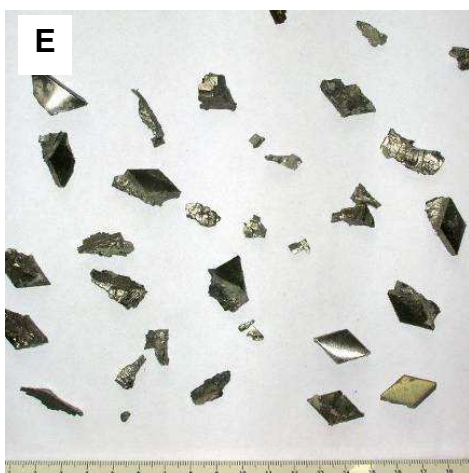
Fig. 64 – Frequenza percentuale.

Dall'istogramma in Fig. 64 si notano le tecniche di guida della frammentazione più efficaci nella formazione delle schegge: ovvero quelle con evidente concentrazione di schegge omogenee in certe classi. In particolare, la tecnologia a doppio casing con corpo interno intagliato ha generato una forte concentrazione di schegge in classi di massa piccola. Invece, con la tecnologia di micro-foratura laser sono state generate schegge fortemente concentrate in classi di massa più grande. Le restanti tecnologie innovative (saldatura laser e nitrurazione) hanno prodotto una distribuzione senza particolari concentrazioni in specifiche classi di massa, come la testa in guerra a frammentazione naturale.

È possibile notare, inoltre, dalla Fig. 62 che tutte le tecniche innovative hanno prodotto frammenti globalmente di massa (e quindi dimensioni) minori se raffrontate alle schegge create per frammentazione naturale. Nello specifico, solo la tecnologia innovativa di nitrurazione ha generato schegge di massa notevoli, come si vede in Fig. 65. Da ciò consegue che tutte le tecnologie hanno una distribuzione con $m_{1/2}$ minore o uguale a quella della frammentazione naturale, come riportato in Tab. IX.

	Frammentazione naturale	Saldatura laser profonda	Micro-foratura laser	Nitrurazione chimica	Doppio casing
$m_{1/2}$	m_{nat}	$0.6 m_{nat}$	m_{nat}	$0.6 m_{nat}$	$0.44 m_{nat}$
n_{ref}	n	$0.96 n$	$1.07 n$	$0.87 n$	$0.61 n$
p_{ref}	p	$1.32 p$	$2.1 p$	$1.19 p$	$1.32 p$
R_{ref}	R	$0.67 R$	$0.56 R$	$0.67 R$	$0.53 R$

Tab. IX – Parametri di confronto tra le tecnologie innovative in esame.



- (Z) Frammentazione naturale
- (B) Saldatura laser profonda
- (E) Micro-foratura laser
- (G) Nitrurazione chimica
- (I) Doppio casing

Fig. 65 – Foto di schegge raccolte dopo i test arena per ogni tecnica testata.

La stessa Tab. IX riporta altri parametri calcolati dai dati sperimentali per valutare le tecnologie in esame. In particolare, n_{ref} rappresenta il numero di schegge rilevato con massa maggiore del valore minimo necessario ad attraversare il target di riferimento e stimato in precedenza. Invece, con p_{ref} si indica il numero di perforazioni conteggiato per ogni tecnologia sul target di riferimento. Infine, il valore R_{ref} rappresenta la classe di massa delle schegge che incrocia, sulla curva cumulata del numero di schegge (Fig. 61), il numero di perforazioni registrato per il target di riferimento. Esso è un indice di demerito delle varie tecnologie inversamente proporzionale alla loro efficienza: infatti, all'aumentare di questo valore cresce l'irregolarità geometrica delle schegge e, quindi, risulta minore la loro capacità di penetrazione a parità di massa.

Sulla base dei dati sperimentali, quindi, il raffronto specifico tra le varie tecnologie innovative prese in considerazione e la frammentazione naturale della testa in guerra di riferimento porta alla conclusione che le tecnologie di controllo della frammentazione migliori sono la micro-foratura laser e quella a doppio casing con corpo interno intagliato. La prima, infatti, ha registrato un forte aumento del numero di perforazioni sia sul target di riferimento che mediamente su tutti gli altri spessori alle distanze in esame. La seconda, invece, ha registrato una distribuzione di massa poco dispersa ed una maggiore regolarità nella forma delle schegge (che ne aumenta la letalità).

5.3 Revisione dei modelli di calcolo

I dati empirici rilevati durante le prove di scoppio statico sono stati utilizzati per la revisione dei modelli di calcolo, preparati prima dell'attività sperimentale. L'obiettivo è avere modelli software in grado di simulare una distribuzione di massa delle frammentazioni più rispondenti ai risultati ottenuti. In particolare, sono stati rivisti i modelli in ambiente Split-X e Autodyn che simulano la frammentazione naturale della testa in guerra di riferimento ed il foglio di calcolo in ambiente Mathcad generato per la previsione della frammentazione controllata.

Il modello di testa in guerra a frammentazione naturale è stato revisionato in alcuni parametri caratteristici del materiale e nella formula di distribuzione di massa (passata da esponenziale a Mott con uno specifico valore del parametro μ [46]). In particolare, è stato aumentato il valore di tensione di rottura impiegato nel modello di frammentazione per il materiale del casing. Questo incremento è stato di circa il 10% ed è giustificato dall'influenza dello strain-rate sul comportamento del materiale [47]. Infatti, è noto che elevate velocità di deformazione applicate a materiali strutturali tendono ad incrudire gli stessi e ad aumentarne i limiti prestazionali. La Fig. 66 riporta i due modelli di distribuzione di massa adottati per la frammentazione naturale prima e dopo la fase sperimentale. Invece, la Fig. 67 mostra le due distribuzioni simulate dal modello previsionale prima e dopo gli scoppi, messe a confronto con i risultati sperimentali.

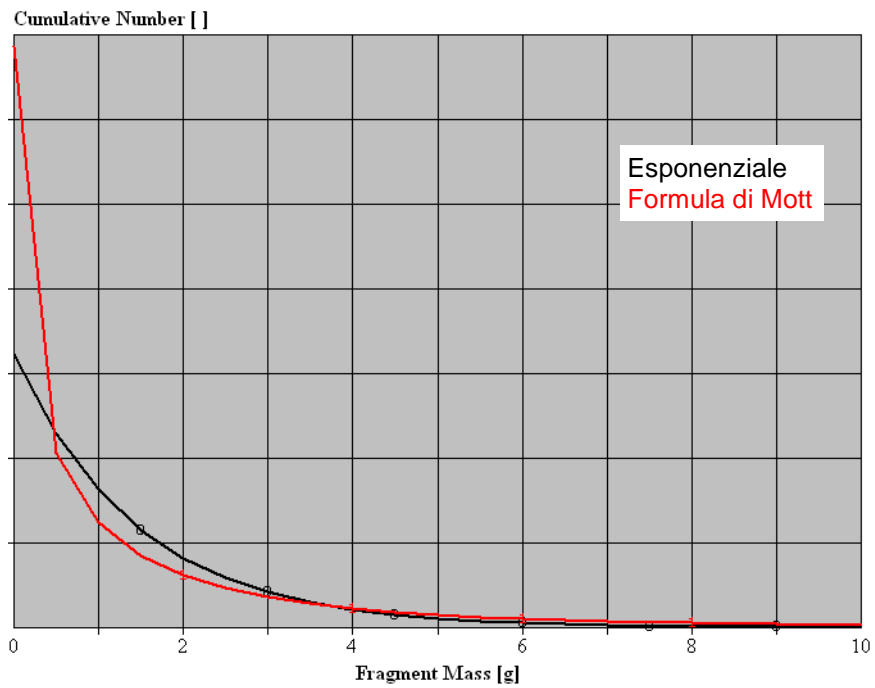


Fig. 66 – Modelli di distribuzione di massa per frammentazione naturale.

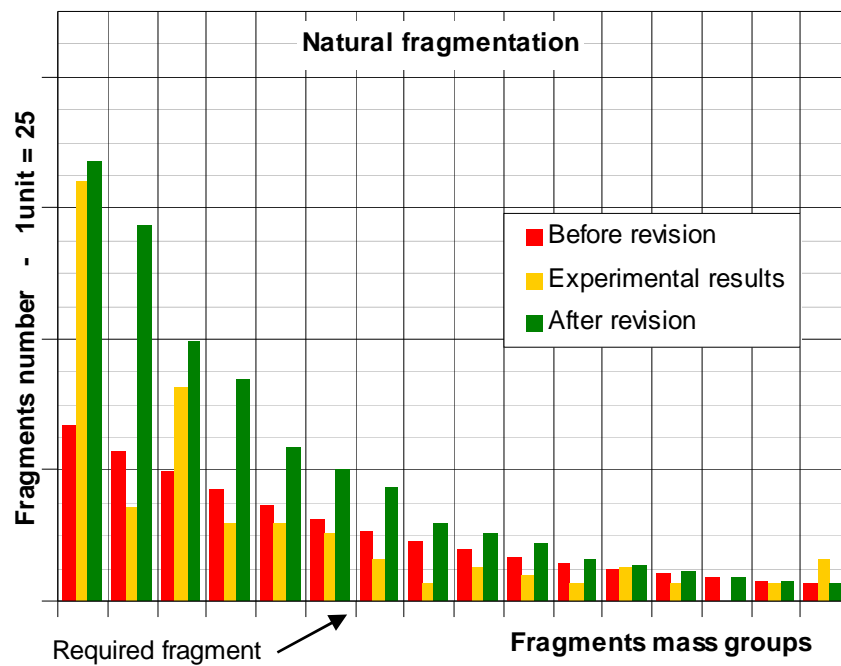


Fig. 67 – Distribuz. schegge da framm. naturale prima e dopo la fase sperimentale.

Per il modello di testa in guerra a frammentazione controllata lo studio delle superfici delle schegge raccolte ha permesso di validare alcune ipotesi alla sua base. Infatti, anche se si sono ritrovate schegge con sole linee di frattura primarie, la maggior parte delle schegge raccolte presenta linee di frattura sia primarie che secondarie. Questo valida l'ipotesi iniziale del modello di considerare la formazione di entrambe le tipologie di linee di frattura. Tale ipotesi comporta una grammatura mediamente inferiore ma concorde con i risultati sperimentali.

Inoltre, la raccolta delle schegge ha denotato una ridotta frequenza sia per le schegge spezzate che per quelle multiple. Questo valida ancora una volta il modello di frammentazione controllata. Mediamente, infatti, la grammatura delle schegge simulate concorda con i risultati sperimentali.

Il modello di testa in guerra a frammentazione controllata è stato modificato nei parametri geometrici del pattern di infragilimento (nello specifico, la profondità di penetrazione di ogni singolo trattamento). La Fig. 68 mostra, ad esempio, la distribuzione di massa simulata per la tecnica di saldatura laser profonda prima e dopo la revisione del modello ed il confronto di questi modelli con i risultati sperimentali. Si notare per questa tecnica la difficoltà a concentrare la distribuzione delle schegge attorno alla massa desiderata, nonostante la modellazione prima della fase sperimentale. Ne consegue che la riduzione di durezza superficiale in corrispondenza del cordone di materiale fuso non è esattamente equiparabile ad una incisione nel casing (ad esempio, come quella ottenuta con groove esterne per asportazione di truciolo).

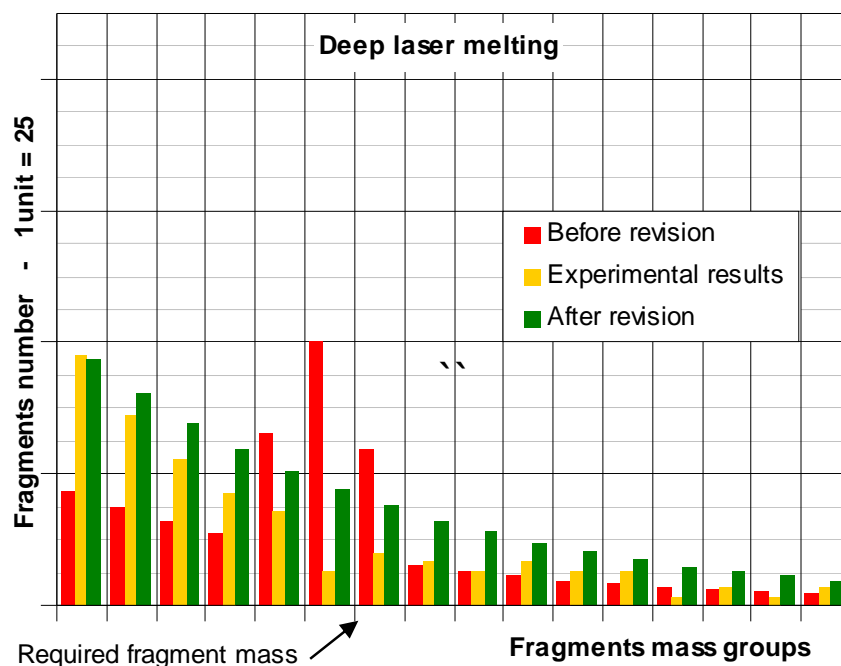


Fig. 68 – Distribuz. schegge con saldatura laser profonda prima e dopo gli scoppi.

Anche il modello di frammentazione controllata con micro-foratura laser è stato rivisto ritoccando il valore della profondità del trattamento. In particolare, i risultati sperimentali hanno evidenziato una maggiore concentrazione di schegge di massa inferiore sia a quella di riferimento che a quella simulata in precedenza. Ne consegue che la profondità di trattamento da considerare nel modello deve essere inferiore rispetto a quella misurata con macrografie o altre tecniche. La Fig. 69 mostra il confronto con i dati sperimentali delle distribuzioni di massa simulate con micro-foratura laser prima e dopo la revisione del modello.

Considerando questo fattore di riduzione per la profondità dei micro-fori, si è cercato il valore di profondità reale per il trattamento che consentisse la creazione di schegge di massa pari al requisito. Questo particolare è evidenziato in Fig. 70 dove si riporta l'andamento, in funzione del numero di principi degli elicoidi, del trattamento della massa delle schegge da frammentazione controllata prima e dopo la revisione del modello previsionale.

Infine, la Fig. 71 rappresenta le simulazioni di frammentazione controllata con tecnica del doppio casing effettuate prima e dopo la revisione del modello. I dati delle simulazioni sono raffrontati nella stessa figura con i risultati sperimentali dei test di scoppio statico. Le schegge raccolte, sono particolarmente numerose nelle grammature inferiori. Ciò è spiegabile con i minori spessori che hanno i singoli casing esterno ed interni comparati con le altre tecniche (la loro somma è pari allo spessore degli altri casing). Per questa tecnica l'aumento necessario per la massa delle schegge si può ottenere variando il pattern geometrico di indebolimento piuttosto che la profondità degli intagli.

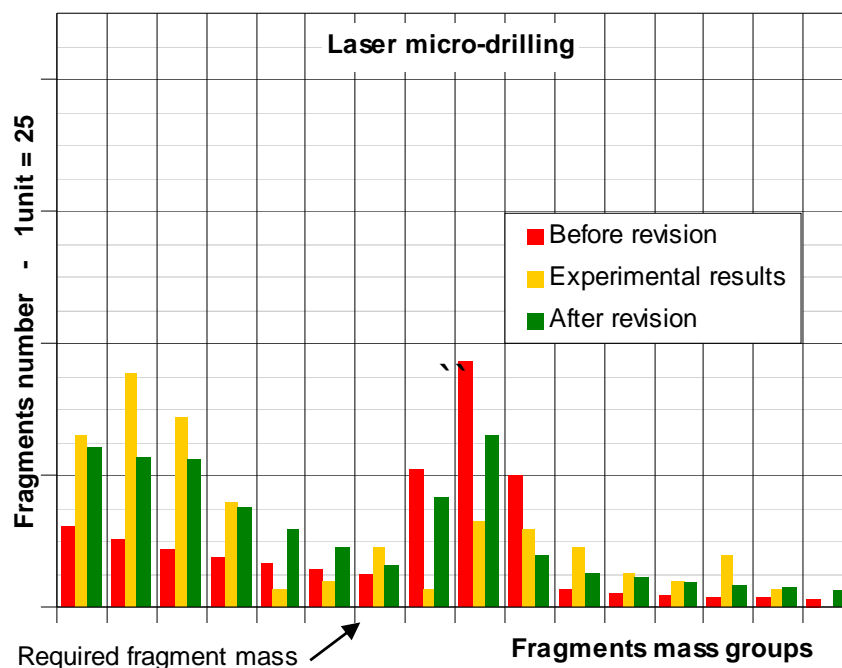


Fig. 69 – Distribuzione schegge con micro-foratura laser prima e dopo gli scoppi.

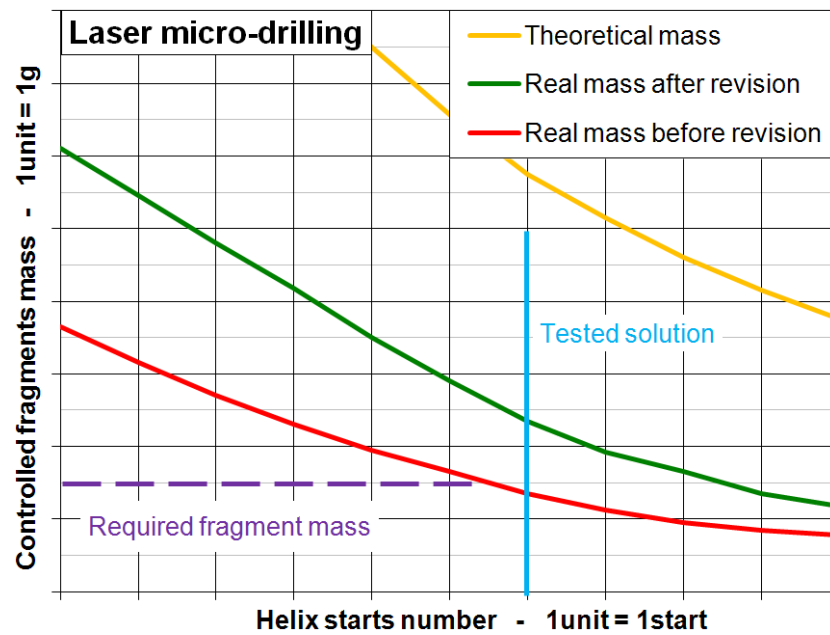


Fig. 70 – Masse schegge da framm. controllata prima e dopo revisione modello.

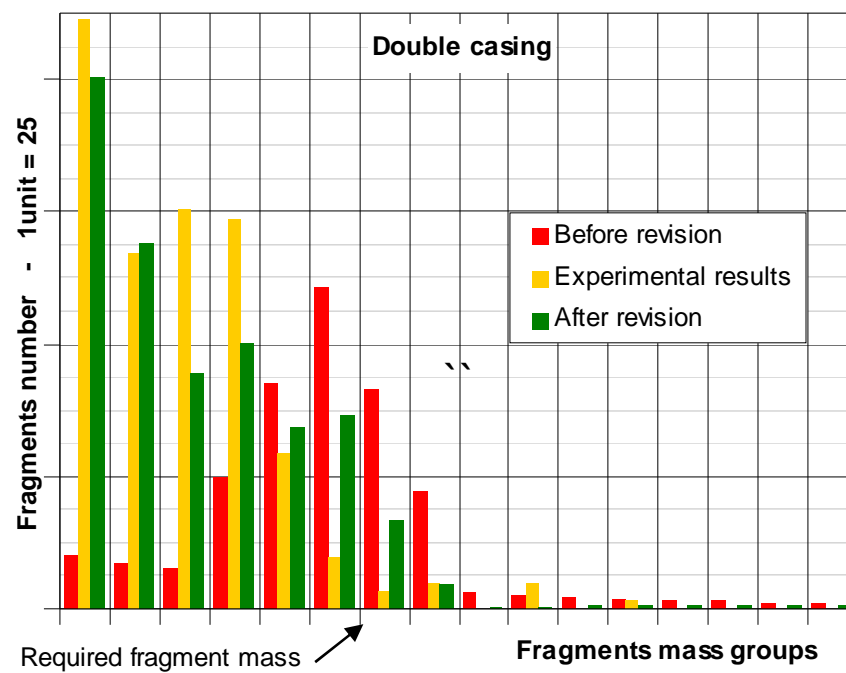


Fig. 71 – Distribuz. schegge con doppio casing prima e dopo gli scoppi.

6. CONCLUSIONI

Dopo aver studiato i principi ed i modelli della frammentazione di teste in guerra, questo studio si è concentrato sull'analisi della teoria e dello stato dell'arte delle tecniche innovative per il controllo della frammentazione in casing di TIG aventi funzioni strutturali per proiettili guidati di ultima generazione. Come termine di riferimento, è stata studiata e simulata la frammentazione naturale della testa in guerra sviluppata per il proiettile sotto-calibrato Vulcano. A seguire, le principali tecniche innovative, individuate allo scopo, sono state sottoposte ad una prima valutazione di tipo tecnico-economico. Da questa sono state scelte cinque configurazioni di prova sottoposte a test di scoppio statico insieme ad una testa in guerra a frammentazione naturale. Prima della fase sperimentale, le singole tecniche sono state dettagliatamente caratterizzate, con simulazioni software e test specifici di laboratorio, al fine di definire i parametri di processo più congeniali all'effetto di infragilimento voluto e che rispettino i limiti di resistenza delle teste in guerra imposti dall'analisi strutturale.

I risultati sperimentali hanno chiaramente dimostrato l'applicabilità con successo di tecniche innovative alla frammentazione guidata di teste in guerra con casing strutturali. Tutte le tecniche sperimentate hanno fatto registrare risultati nettamente migliori della frammentazione naturale presa a riferimento. Tra queste tecniche, due in modo particolare hanno incrementato notevolmente le prestazioni della testa in guerra a frammentazione naturale: la tecnica di micro-foratura laser e quella a doppio casing con corpo interno intagliato. Inoltre, con i dati acquisiti è stato possibile revisionare i modelli software di analisi e previsione della frammentazione progettati nella prima fase dello studio.

Partendo dai risultati conseguiti, OTO Melara sta progettando il proseguo delle attività fin qui svolte con l'obiettivo di massimizzare l'efficacia delle tecniche innovative risultate migliori da questo studio. Le attività future si baseranno sull'analisi di sensitività dei vari parametri tecnologici e di progetto che intervengono nella dinamica di controllo della frammentazione per le specifiche tecniche in esame. In particolare, non potendo variare i parametri di progetto fondamentali come geometria e proprietà di casing ed esplosivo, si studierà in dettaglio, attraverso simulazioni preliminari e test sperimentali di verifica, l'influenza di tutti i parametri di processo che caratterizzano queste due tecniche innovative.

RIFERIMENTI

1. Juvinall, R. C., and Marshek, K. M., 2006, "Fundamentals of Machine Component Design", 4th edition, John Wiley & Sons, New York.
2. Faupel, J. H., and Fisher, F. E., 1981, "Engineering Design, A Synthesis of Stress Analysis and materials Engineering", 2nd edition., John Wiley & Sons, New York.
3. Meyers, M. A., 2001, "Dynamic Behavior Materials", John Wiley & Sons, New York.
4. Zukas, J. A., Nicholas, T., Swift, H. F., Greszczuc, L. B. and Curran, D. R., 1982, "Impact Dynamics", John Wiley & Sons, New York.
5. Biggs, J. M., 1964, "Introduction to Structural Dynamics", McGraw-Hill, New York.
6. Johnson, W., 1972, "Impact Strength of Materials", Edward Arnold, London.
7. Kinslow, R., 1970, "High-Velocity Impact Phenomena", Academic Press, New York.
8. Wilbeck, J. S., Anderson, C. E., Wenzel, A.B., Westine, P. S., Lindholm, U.S., 1985, "A Short Course on Penetration Mechanics", South-Western Research Institute, Houston.
9. Carleone, J., 1993, "Tactical Missile Warheads", *Progress in Astronautics and Aeronautics*, A. R. Seebass, ed., AIAA, Washington, DC, Vol. 155.
10. NIMIC, 2002, "Fragment impact testing: NIMIC's review and proposal", NATO Insensitive Munitions Information Center, L-86, Brussels, Belgium.
11. Karpp, R. R., and Predebon, W. W., 1975, "Calculations of Fragment Velocities from Naturally Fragmenting Munitions", Ballistic research Laboratory, Report No. BRL-MR-2509.
12. Anderson, C. E. Jr., 1987, "An Overview of the Theory of Hydrocodes", *International Journal of Impact Engineering*, **5**(1-4), pp. 33-59.
13. Hoggart, C. R., and Recht, R. F., 1968, "Fracture Behavior of Tubular Bombs", *Journal of Applied Physics*, **39**(3), pp. 1856-1862.
14. Al-Hassani, S. T. S., Hopkins, H. G., and Johnson, W., 1969, "A Note on the Fragmentation of Tubular Bombs", *International Journal of Mechanical Sciences*, **11**(6), pp. 545-549.
15. Al-Hassani, S. T. S., and Johnson, W., 1969, "The dynamics of the fragmentation process for spherical shells containing explosives", *International Journal of Mechanical Sciences*, **11**(10), pp. 811-823.
16. Grady, D. E., and Kipp, M. E., 1997, "Fragmentation properties of metals", *International Journal of Impact Engineering*, **20**(1-5), pp. 293-308.
17. Chen, D., Al-Hassani, S. T. S., Yin, Z., and Yu, Y., 2001, "Modeling shock loading behavior of concrete", *International Journal of Solids and Structures*, **38**, pp. 8787-8803.
18. Mercier, S., Grannier, N., Molinari, A., Llorca, F., and Buy, F., 2010, "Multiple necking during the dynamic expansion of hemispherical metallic shells, from experiments to modelling", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, **58**, pp. 955-982.
19. Predebon, W. W., Smothers, W. G., and Anderson, C. E. Jr., 1977, "Missile Warhead Modeling: Computations and Experiments", Ballistic Research Laboratory, Report Number BRL-MR-2796.

20. Anderson, C. E. Jr., Predebon, W. W., and Karpp, R. R., 1985, "Computational Modeling of Explosive-Filled Cylinders", *International Journal of Engineering Sciences*, **23**(12), pp. 1317-1330.
21. Bailey, J. A., 1969, "The plane strain forging of aluminum and an aluminum alloy at low strain rates and elevated temperatures", *International Journal of Engineering Sciences*, **11**(6).
22. Bailey, J. A., Haas, S. L., and Shah, M. K., 1972, "Effect of strain-rate and temperature on the resistance to torsional deformation of several aluminum alloys", *International Journal of Engineering Sciences*, **14**(11).
23. Johnson, G. R., and Cook W. H., 1983, "A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures", 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands.
24. Johnson, G. R., and Cook W. H., 1985, "Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures", *Engineering Fracture Mechanics*, **21**(1).
25. Beetle, J. C., and Schwartz, M., 1976, "Survey and Assessment of Fragmentation Materials/Concepts", U.S. Army Armament Command, Tech. Rep. FA-TR-76029.
26. de Rosset, W. S., 2008, "Controlled fragmentation of grooved cylinders", U.S. Army Research Laboratory
27. Hirvonen, J. C., Snoha, D. J., Montgomery, J. S., Kecskes, L. J., Gray, D. M., and de Rosset, W. S., 2009, "Use of Liquid Metal Embrittlement (LME) for Controlled Fracture", Army Research Laboratory, Tech. Rep. ARL-TR-4976.
28. O'Donoghue, P. E., Predebon, W. W., and Anderson, C. E. Jr., 1988, "Dynamic Launch Process of Preformed Fragments", *Journal of Applied Physics*, **63**(2), pp. 337-348.
29. Gurney, R. W., 1943, "The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Grenades", Army Ballistic Research Laboratory, Report No. BRL 405.
30. Elek, P., and Jaramaz, S., 2007, "Size Distribution of Fragments Generated by Detonation of Fragmenting Warheads", 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain.
31. Nasim, M., Al-Hassani, S. T. S., and Johnson, W., 1971, "Stress wave Propagation and Fracture in Thin Curved Bars", *International Journal of Mechanical Sciences*, **13**(7).
32. Chen, D., Al-Hassani, S. T. S., Sarumi, M., and Jin., X., 1997, "Crack straining-based spall model", *International Journal of Impact Engineering*, **19**(2).
33. Sandstrom, D. J., 1989, "Armor and Anti-Armor Materials by Design", Los Alamos Science, pp. 36-50.
34. Hogg, P. J., "Composites for Ballistic Applications", University of London *Queen Mary*.
35. Pearson, J., 1990, "A Fragmentation Model for Cylindrical Warheads", Naval Weapons Center, Report No. NWC-TP-7124.
36. Pearson, J., 1978, "The Shear Control Method of Warhead Fragmentation", 4th International Symposium on Ballistics, Monterey, CA.
37. Craig, B. G., Honnel, R. E., Lederman, G. F. Jr., and Sandstrom, D. J., 1975, "High-Density Metals and Metallic Composites for Improved Fragmentation Submunitions", Los Alamos Scientific Laboratory, Report No. LA 6069-MS.

38. Shepherd, W. C. F., and Gibson, J. W., 1952, "The Development of Rubber Liners for the Grooved-Charge Method of Controlling Fragmentation", Armament Research Establishment.
39. "Split-X[®]" CONDAT, GmbH. Maximilian Str. 28, 85298 Fernhag, Germany.
40. "Autodyn[®] release 12.1", 2009, user's manual Ansys Inc.
41. Ballistics Analysis Laboratory, 1961, "Project THOR: The Resistance of Various Metallic Materials to Perforation by Steel Fragments; Empirical Relationships for Fragment Residual Velocity and Residual Weight", Technical Report No. 47, John Hopkins University, Baltimore, MD.
42. "Ansys[®] Workbench release 11.0", 2008, user's manual Ansys Inc.
43. "Mathcad[®] 14", 2007, user's manual.
44. Gold, V. M., Baker, E. L., and Poulos, W. J., 2007, "Modeling Fragmentation Performance of Natural and Controlled Fragmentation Munitions", 23rd International Symposium on Ballistics, Terragona, Spain.
45. Arnold, W., 2001, "Controlled Fragmentation", Shock Compression of Condensed Matter–2001, pp. 527-530.
46. Mott, N. F., 1943. "Fragmentation of High Explosive Shells, A Theoretical Formula for the Distribution of Weights of Fragments", Army Operations Group Research.
47. Vastola, "Strain-rate influence on mechanical behavior of structural materials", University of Naples *Federico II*